REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE YAHYA FRERES MEDEA



FACULTE DE TECNOLOGIE

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux En Génie Civil

Etude des propriétés thermo- mcaniques d'une matrice cimentaire renforcée par des fibres végétales

Réalisé Par :

Mr Merzougui abderrazak
Mr Allag rabah

Proposé et dirigé par :

Mme KALLOU Amel

Année Universitaire : *2019/2020.*

REMERCEMENT

Nous rémérions dieu le tout puissant de nos avoir donner la force d'atteindre notre but et d'accomplir avec succès ce modeste travail.

Et nous tenons à remercier notre encadreur KALLOU AMAL Pour ces conseils illumines et son aide précieux pour achever notre mémoire. Nous remercions aussi tous les enseignants du département de Génie Civil et aux ingénieurs de laboratoire de génie civil sans exception.

Nous remercions la promotion de Master II génie civil 2019/2020, et tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents, Je les remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toutes ces années d'étude sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Et je remercie aussi mes frères et ma sœur, A ma famille, A tous mes fidèles amis :ABDERRAZAK , MOHAMED ,MORAD,HAITHAM , KHALED pour leur aide et leur encouragement.

À tous ceux qui ont contribué à ma formation. Que ce travail soit l'expression de ma vive gratitude et de mon profond attachement.

Rabah

Je dédie ce travail à mes très chers parents Je remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toutes ces années d'étude sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Et je remercier aussi mes frères et mes sœurs.

À tous mes fidèles amis : MEFTAH, MOHAMED, RABAH, MORAD, HAITHAM, KHALED pour leur aide et leur encouragement.

À tous ceux qui ont contribué à ma formation.

Abderrazak

Résumé

L'objectif de ce travail est la valorisation des fibres végétales d'alfa dans l'amélioration des propriétés mécaniques et thermiques des briques de terre comprimées BTC, avec un pourcentage de (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3%). Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage d'incorporation des fibres d'alfa. Mais la conductivité thermique diminue. De plus les résultats montrent que le matériau ainsi obtenue est beaucoup plus isolant que résistant destiné aux éléments de séparation dans le bâtiment.

Les mots clé : Matériaux composite, Bloc de terre comprimée, Fibre végétale, Fibre Alfa, Résistance.

Abstract

The objective of this work is the valuation of Alfa plant fibers in improving mechanical and thermal properties of BTC compressed earth bricks, with a percentage of (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3%). The results obtained show that the compressive strength decreases with the increase in the percentage of Alfa fibers incorporation. But thermal conductivity decreases. In addition, the results show that the material thus obtained is much more insulating than resistant intended for the separation elements in the building.

The key words: Composite materials, compressed earth block, Plant fiber, Alfa fiber, Resistance.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقييم ألياف نبات الحلفاء في تحسين الخواص الميكانيكية والحرارية للطوب الترابي المضغوط BTC بنسبة (0.5، 1، 1.5، 2، 2.5، 3٪). . أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن مقاومة الانضغاط تتناقص مع زيادة نسبة دمج ألياف الحلفاء. لكن الموصلية الحرارية تقل. بالإضافة إلى ذلك ، تظهر النتائج أن المادة التي يتم الحصول عليها بهذه الطريقة تكون عازلة أكثر بكثير من المقاومة المخصصة لعناصر الفصل في المبنى.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة ، كتلة أرضية مضغوطة ، الألياف النباتية ، ألياف ألفا ، المقاومة.

SOMMAIRE

Remerciement II

Dédicace III

Résumé IV

Sommaire V

Synthèse bibliographique V

Symboles et unités IX

Liste des figures X

Liste des tableaux XIV

Introduction générale 15

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1.1.Historique :…… 19
1.2.Consommation d'énergie :..... 19
1.2.1. Le contexte et les enjeux : 19
1.2.1.1. L'évolution de la normalisation dans le domaine de la construction : 20
1.2.1.2. La réglementation thermique en France:.....20
1.2.1.3.Notion de cycle de vie des matériaux et d'énergie grise :……..……...21
1.2.2.Développement durable :……..……22
1.3. Le matériau terre……..……...22
1.3.1. La construction en terre dans le monde :..... 23
1.3.2. La construction en terre dans l'Algérie [2]..... 24
1.3.3. Réglementation de l'utilisation de la terre dans la construction :..... 25
1.3.4. Avantages de la construction en terre ……...…….26
1.3.5.Inconvénients de la construction en terre :……...……27

1.4.Techniques d'utilisation de la terre en construction 27
1.4.1.La bauge :……. 28
1.4.2.Le torchis :……..... 28
1.4.3.Terre-paille :…… 29
1.4.4. Les Adobes :…… 30
1.4.5.Le pisé :……..…. 30
1.4.6.Les blocs de terre comprimée (BTC) : 31
1.4.7.Diversités des produits de blocs de terre comprimée « BTC » 32
1.4.8.La construction en BTC dans le monde et en Algérie : 33
1.5. Stabilisation des sols : 34
1.5.1.Stabilisation mécanique : 34
1.5.1.1.Mode de compactage :……..…….35
1.5.1.2.Contrainte de compactage ;……..…….35
1.5.1.3.Influence de la teneur en eau sur la densité :……..……..36
1.5.2.Stabilisation physique..... 38
1.5.3.Stabilisation chimique 39
1.6.Renfoncement des matériaux composites par des fibres : 39
1.6.1.Les fibres végétales : ..... ……40
1.6.2.Différents types de fibres végétales : ..... ……..40
1.6.2.1.Fibres de jute :……..41
1.6.2.2.Fibres de chanvre :……....41
1.6.2.3.Fibres de sisal :…….…….42
1.6.2.4.Fibres de lin :…….……42
1.6.2.5.Fibres de ramie :…….……...43
1.6.2.6.Fibres d’alfa :……43
1.6.3.Structure d’une fibre végétale :..... 44
1.6.3.1.La cellulose :…….…….……45
1.6.3.2.L’hémicellulose……..…….……...…46
1.6.3.3.Les lignines……..…….46
1.6.4.Composition chimique des fibres végétales : 48
1.6.5.Propriétés physico-mécaniques des fibres végétales :..... 48
1.6.6.Traitements des fibres végétale……..…..……..49
1.6.6.1.Traitement physique…..……..…..49
1.6.6.2.Traitement chimique……..... 49
1.6.6.3.Traitement thermique……..……..50
1.6.7.Avantages et inconvénients des fibres végétales 51
1.6.8.Présentation Générale de fibre alfa 51
1.6.9.Nomenclature etclassification Botanique 52
1.6.10.Répartition Géographique..... 52
1.6.11.Etude Botanique 53

1.6.12.La Récolte De l'Alfa 54
1.6.13.Domaines D'applications……55
1.6.13.1.Applications artisanales :……..……..……...…55
1.6.13.2.Applications industrielle…….…….……..…..55
1.6.14.Intérêt Ecologique Et Enjeu Socio-économique……..……...56
1.6.14.1.Intérêt Ecologique…….……...…56
1.6.14.2.Enjeu Socio-Economique……..……..……..…56
1.7.Influence des fibres végétales sur propriétés mécaniques des BTC…….....57
1.7.1.Résistance à la compression .....……57
1.7.2.Résistance à la traction par flexion 58
1.7.3.La porosité…….....58
1.7.4.L'absorption capillaire.....59
1.8.Influence des fibres de Halfa sur les propriétés thermique 59
1.9.Synthèse…… 59

Chapitre II: Matériaux utilisées et Méthodes Expérimentales

2.1 .Introduction…….....61
2.2 .Matériaux utilisé……61
2.2.1.Le Sable.....…….……61
2.2.2.Le ciment…..……..…..64
2.2.3.Eau de gâchage……66
2.2.4.La fibre d'alfa…….…..67
2.2.5.Le sol…….…….…..…68
2.3 .Formulations des BTC……...74
2.3.1. Compactage :…….....74
2.3.2.Composition des BTC……..74
2.3.3.Malaxage et compactage……..75
2.3.4.Conservation des éprouvettes……...75
2.4.Protocol expérimentale……....76
2.4.1.Essai de compression……...76
2.4.2.Essai traction par flexion……..76
2.4.3.Conductivité thermique……77
2.4.4.Porosité…….……78
2.4.5. par capillarite……..…….……..……..78
2.4.6.Variation dimensionnelle……..79
2.5.Variables étudiées…….……...80
2.6.Conclusion…….……..83

Chapitre III : Résultats et interprétation

3.1 Introduction……...……..…...85
3.2.Influence fibres de Halfa sur les propriétés mécaniques des BTC……85
3.2.1 .Résistance à la compression :……..……..85
3.2.2. Résistance à la traction par flexion……..……87
3.3. Influence fibres de Halfa sur les propriétés thermiques des BTC……87
4. conclusion générale……..88
5. Recommandations et Perspectives…….…….…….….89

Symboles et unités

ES : équivalent de sable(%)

Ɣ : taux d'absorption de fibre d'alfa(%)

M(h) : la masse humide (g)

M(s) : la masse sèche(g)

W : Teneur en eau pondérale d'un matériau(%)

md : la masse des grains solides(g)

mw : la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage(g)

Wat : Teneur en eau naturelle d'un matériau(%)

ρ : la masse volumique (g/cm3)

d : la densité

W_l : Limite de liquidité(%)

W_p *: Limite de plasticité*(%)

Ip : Indice de plasticité(%)

Ic : Indice de consistance (%)

Б : la contrainte normale de traction

n : La porosité totale d'un matériau poreux(%)

Vv : volume des vides

Vt : le volume total de l'échantillon

Wmax : la teneur en eau maximale (%)

Rc : Résistance à la compression (Mpa)

Rt : La Résistance à la traction par flexion (Mpa)

λ: La Conductivité thermique des BTC(X/m.k)

R : coefficient corrélation

MF : module de finesse de sable

Liste des Figures

Figure I.01	Consommation d'énergie dans le patrimoine bâti entre 1970 et 2006	**1**
Figure I.02	Architecture de terre dans le monde	**2**
Figure I. 03	Schéma des différentes techniques de construction en terre CRA Terre	**3**
Figure I.04	Construction d'un mur en bauge. [http://empreinte.asso.fr/la-bauge].	**4**
Figure I. 05	Préparations de torchis [Marchal - Maisons Paysannes de France].	**5**
Figure I. 06	Maison en Terre paille. (Enquête paille Broustey)	**6**
Figure I.07	a) et (b) Technique de fabrication de l'adobe ; (c) Maison en adobe en Construction.	**7**
Figure I.08	Etape d'exécution d'un mur en pise.	**8**
Figure I.09	Brique de terre comprimée	**9**
Figure I.10	Différents produits de blocs de terre comprimée	**10**
Figure I.11	Centre de l'architecture de terre au Mali	**11**
Figure I.12	Logements collectifs R+1 à SidiBel Abbes (Algérie)	**12**
Figure I.13	Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde	**13**
Figure I. 14	Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la Structure du sol	**14**

Figure I.15	Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur Les résistances mécaniques)	**15**
Figure I.16	Relation typique entre la teneur en eau- densité	**16**
Figure I.17	Absorption totale en fonction de la teneur en sable	**17**
Figure I.18	Classification des fibres végétales	**18**
Figure I.19	Le jute	**19**
Figure I.20	Le chanvre	**20**
Figure I.21	Le sisal	**21**
Figure I.22	Le lin	**22**
Figure I.23	La ramie	**23**
Figure I. 24	l'Alfa	**24**
Figure I.25	Structure schématique d'une fibre végétale.	**25**
Figure I.26	Molécule de la cellulose.	**26**
Figure I.27	Structure d'un type de xyloglucane.	**27**
Figure I.28	Représentation schématique de la lignine	**28**
Figure I.29	Différents composants de la plante d'Alfa.	**29**
Figure I.30	Récolte d'Alfa	**30**
Figure I.31	Utilisation artisanale des tiges d'Alfa	**31**
Figure I.32	Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres	**32**
Figure I.33	Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée	**33**

		34
Figure II.1	Essai d**'**équivalent de sable	**35**
Figure. II .2	Fibres d'Alfa	**36**
Figure. II. 3	Traitement des fibres d'Alfa	**37**
Figure II.4	Différents état du sol	**38**
Figure. II.5	Essai au pénétromètre	**39**
Figure. II.6	Détermination de la limite de plasticité	**40**
Figure. II.7	Compactage des éprouvettes	**41**
Figure. II.8	Malaxage et compactage des éprouvettes	**42**
Figure II.9	Presse hydraulique	**43**
Figure II .10	Demi-prismes de l'éprouvette	**44**
Figure II.11	Essai de traction par flexion	**45**
Figure II.12	Essai thermique	**46**
Figure II.13	Mesure de la porosité	**47**
Figure II.14	Imbibition par capillarité	**48**
Figure III.1	Résistance à la compression des BTC à base de fibres de Halfa	**49**
Figure III.2	Résistance à la traction des BTC à base de fibres de Halfa	**50**
Figure III.3	Conductivité thermique en fonction des fibres de Halfa	**51**

Liste des tableaux

Tableau I.1	Description of country spécifique guidelines/codes for earth construc	**1**
Tableau I.2	Présente La composition chimique de certaines fibres végétales	**2**
Tableau I.3	Propriétés physico-mécaniques des fibres végétales comparées aux renforts	**3**
Tableau I.4	Présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort dans les composites	**4**
Tableau I.5	Classification Botanique	**5**
Tableau II.1	Classification des sables selon leur équivalent de sable	**6**
Tableau II.2	Caractéristiques physiques du sable utilisé	**7**
Tableau II.3	Caractéristiques chimique du CPJ CEM II/A 42.5	**8**
Tableau II.4	Caractéristiques physiques du CPJ CEM II/A 42.5	**9**
Tableau II.5	La valeur de taux absorption de fibre d'alfa	**10**
Tableau II.6	Degrés de plasticité des sols	**11**
Tableau II.7	Limites d'Atterberg du sol utilisé	**12**
Tableau II.8	Composition des BTC à base de fibres de halfa	**13**

Introduction générale

Aujourd'hui, à l'échelle nationale et internationale, dans les domaines de l'industrie, de l'énergie, des transports et de la construction. Les incitations et les contraintes sont de plus en plus robustes pour incorporer les projets à une démarche de développement durable.

Malgré le développement technologique qu'a connu l'humanité ces derniers siècles et qui a permis à l'homme moderne de disposer d'une grande variété de matériaux de construction tels que le béton et l'acier, nous assistons aujourd'hui à un retour croissant à la construction en terre crue dans des pays du tiers monde comme dans les pays industrialisés. Il est à noter que les pays industrialisés ont la chance de profiter du développement des techniques de production très variées, soutenues par des recherches scientifiques. Une des raisons de l'utilisation de la terre en construction est sa disponibilité et sa proximité du site de réalisation de l'habitat. Parmi les avantages de la terre crue, nous pouvons aussi souligner le peu d'énergie que nécessitent sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et une bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en saison chaude et qui conserve la chaleur en saison froide.

Les avantages qu'on reconnait aux constructions en terre crue, elles présentent tout de même, sous sa forme non stabilisée quelques défauts tels que : le déficit en résistance mécanique, la fissuration systématique due au retrait et surtout sa forte sensibilité à l'eau. Depuis l'antiquité à nos jours, l'homme a cherché à corriger ses défauts en utilisant plusieurs moyens de stabilisation de la terre en vue d'améliorer ses performances et sa sensibilité vis-à-vis de l'eau.

Cette tentative a conduit à la naissance de plusieurs produit en terre : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée(BTC) et autres. Par rapport à l'his-

toire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente, elle permet d'avoir des blocs d'un format très souple sur le plan de la maçonnerie et peut s'intégrer aussi bien dans une structure poteau-poutre comme matériau de remplissage que comme matériau principal dans un mur porteur.

L'usage des matériaux composites concerne de plus en plus le secteur de la construction, dont la principale motivation est le gain de poids, allié à d'excellentes caractéristiques mécaniques. Le contexte actuel particulièrement soucieux de l'impact environnemental amène à l'utilisation de fibres naturelles végétales pour remplacer les fibres synthétiques et même certains granulats dans les matériaux à matrices minérales. Les principales propriétés obtenues par incorporation de fibres végétales sont donc l'augmentation des résistances en traction, en flexion et à la compression, la limitation de la fissuration au jeune âge par diminution du retrait plastique par rapport aux fibres usuelles et enfin l'amélioration de la ductilité.

Renforcer les sols à l'aide de fibres végétales constitue une avancée majeure dans la transition vers l'utilisation des éco-matériaux dans la construction durable. Leur utilisation, soit pour confectionner des éco-géotextiles, soit mélangées aux sols pour constituer un matériau composite, a rencontré récemment quelques succès dans le domaine de l'ingénierie de la construction (stabilité des sols et des remblais, lutte contre l'érosion, infiltrations, ….) en substitution aux fibres de renfort synthétiques utilisées dans les géotextiles notamment.

Pour cela, plusieurs études se sont intéressées à l'étude du rôle des fibres de plantes telles que les fibres de coco, de jute, de palme ou de sisal, sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols instables.

Le but de notre travail est une contribution à la valorisation des fibres d'alfa dans les briques de terre comprimées, en vue d'améliorer les performances mécaniques et surtout thermiques des matériaux de construction et d'assurer la stabilité du talus en remblai. Le choix de cette plante a pour but de valoriser cette ressource végétale très abondante dans le bassin méditerranéen et plus particulièrement en Algérie, et de tirer parti de ses propriétés mécaniques.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les BTC et le renforcement des blocs de terre instables à l'aide des fibres végétales. Il dresse aussi un état des connaissances sur la plante alfa, ses propriétés physiques et chimiques.

Le second chapitre donne une description des matériaux utilisés et les essais réalisés.

Le dernier chapitre est consacré à la représentation des résultats et leurs interprétations. Les différents résultats sont analysés séparément. Finalement, on terminera ce travail par une conclusion générale et des recommandations pour compléter cette modeste étude.

Chapitre I
Synthèse bibliographique

1.1. Historique :

L'histoire des constructions humaines montre des formes d'habitat développées selon les besoins des personnes tout en tenant compte des facteurs climatiques (Houben et Guillaud, 1994). La topographie et la géographie du milieu sont des conditions favorables au développement de l'habitat avec l'utilisation d'une variété de matériau de construction. Cependant, la terre est restée un matériau de construction traditionnel (Bui et al, 2009).

Par ailleurs l'un des actes les plus louables suscités par l'imagination créative de l'esprit humain est l'acte de construire. Pour accomplir cette mission historique, l'homme se servait des matériaux de son environnement. Aujourd'hui, le modernisme et le snobisme poussent la plupart de nos concitoyens, notamment ceux des campagnes à construire en ''dur'' avec des agglomérées de sable et de ciment ou du béton classique. Ils abandonnent alors les matériaux de proximité, qui certainement devraient pouvoir être d'une qualité suffisante, pour répondre au niveau de sollicitations exigées pour leur construction. La conséquence est l'augmentation du coût de ses produits, du fait de la distance de transport très grande.

Dans nos sociétés traditionnelles ils existent des murs en terre battue. Ces murs de terre battue ont été construits et exposés pendant plusieurs décennies à l'altération naturelle, dans un climat continental humide. Aucun de ces murs n'a montré un effondrement à ce jour (Bui et al, 2009).

1.2. Consommation d'énergie :

1.2.1. Le contexte et les enjeux :

Aujourd'hui, les politiques portent une attention particulière à la réduction de La consommation d'énergie fossile et non renouvelable. Cela s'explique comme l'indique le ministère du logement par différents facteurs :

- L'augmentation du prix des carburants fossiles lié à une demande venue des pays émergents comme la Chine et le Brésil.
- La diminution des ressources non renouvelables.
- Le dérèglement du climat avec une augmentation de la proportion de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Par conséquent, en France, les politiques tendent à réduire la consommation d'énergie et à rendre plus performant les techniques industrielles, les matériaux de production et les techniques de fabrication. En 2011, la production de CO2 engendrée par la France métropolitaine est de 346 Mt ce qui représente une diminution de 11% par rapport au niveau d'émission de 1990 se qui dépassent les objectifs de stabilisation des émissions de CO2 prise par la France à travers le protocole de Kyoto. La répartition par domaine d'activité des émissions de CO2 en France métropolitaine est la suivante :

- Transformation d'énergie : 15%
- Industrie : 25%
- Transport : 37%
- Agriculture : 2%
- Construction : 21%

Entre 1990 et 2011, la part des émissions de CO2 pour le domaine de la construction à Diminuée de 13%. En ce qui suit, nous allons voir les mécanismes ayant permis de diminuer la production de gaz à effet de serre dans le domaine de la construction en abordant la normalisation **[1].**

1.2.2. L'évolution de la normalisation dans le domaine de la construction :

La réglementation thermique en France :

Le premier axe de diminution de la production de gaz néfaste pour l'environnement consiste à augmenter les exigences de conformité thermique des bâtiments. Depuis les années 70, la France a mis en œuvre des normes permettant d'améliorer les performances thermiques des bâtiments neufs et anciens. La **(Figure I.1)** représente les différentes évolutions de la réglementation thermique. On peut constater depuis ce quart de siècle une augmentation ces dernières années des exigences sen matière de thermique et de consommation d'énergie. Cela s'explique par le contexte et les signaux d'alarme enclenchés par les différents experts planétaires et l'obligation de limiter nos dépenses en énergie pour le moins trop importantes.

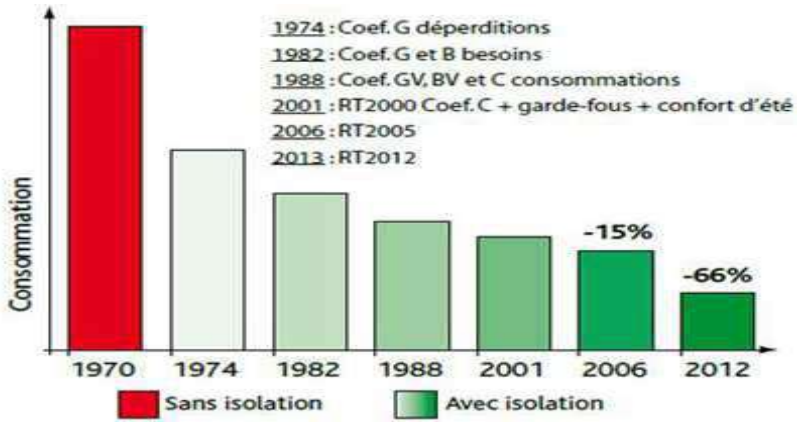


Figure I.1 : Consommationd'énergie dans le patrimoine bâti entre 1970 et 2006 [8]

Auparavant, aucune règle obligée l'isolation thermique d'une habitation ou d'une construction jusqu'à 1974, la première réglementation thermique est appliquée. Depuis, certain nombre de norme, de plus en plus exigeante avec l'amélioration des performances des matériaux et des techniques de mise en œuvre ont permis de réduire considérablement la consommation d'énergie. En 2006, la RT2005 est mise en vigueur. Elle a pour but de réduire la consommation d'énergie de 15% par rapport à la RT2000. Pour ce faire, elle augmente les exigences en matière de résistance thermique des parois extérieures des constructions et intègre la notion de perméabilité à l'air d'une construction.

En 2013, la RT 2012 permet d'accentuer la diminution du domaine de la construction sur les émissions de CO2 en France. Cette réglementation permet d'introduire la notion d'apport gratuit (apports solaires…), d'énergie renouvelable et de confort thermique (Déphasage, Inertie…) **[2].**

Notion de cycle de vie des matériaux et d'énergie grise :

La consommation en matière première et de l'énergie du matériau jouent un rôle essentiel dans la réduction de la production des gaz néfastes. L'analyse du cycle de vie ou l'énergie grise permet d'observer l'impact du matériau sur l'environnement [19].

Cette analyse introduit la notion d'impact environnemental d'un matériau de construction sur l'ensemble de son utilisation. Cela englobe :

- sa production (extraction des matières premières, transformation, cuisson…) ;
- son transport- sa mise en œuvre ;
- sa mise en œuvre ;
- sa fin de vie (recyclage, son stockage…).

Les différentes caractéristiques recueillies sont résumées dans des fiches de données environnementales et de sécurité (FDES). Ces fiches peuvent représenter un atout pour promouvoir le caractère peut consommateur d'énergie et satisfaire à un cahier d'exigence de type haute qualité environnementale. Elles sont plus fréquemment rencontrées publiés sur les sites des fabricants ce qui permet de justifier ou non le caractère écologique de la fabrication d'un matériau de construction. Suivant le type de matériau et sa fonction, des études sur l'énergie grise ont permis de quantifier la quantité d'énergie grise produite sur chacun des matériaux. Le développement des matériaux bio-sources tels que le béton de chanvre ou les matériaux à base de laine végétale diminuent l'impact environnemental de ces derniers sur l'environnement.

Développement durable :

La notion de développement durable et de la diminution de l'impact environnemental du domaine de la construction sur les gaz à effet de serre et la consommation d'énergie par le durcissement et l'évolution de la normalisation française remet en avant les matériaux renouvelables ou à faible impact environnemental tels que les laines animales, végétales ou les matériaux issus du recyclage. La construction à base de terre crue peut répondre aussi à ces différents critères en favorisant des filières de production courte et peu consommatrice en CO_2 et énergie fossile.

1.3. Le matériau terre :

La **terre** présente plusieurs avantages tels que la facilité de construire, sa disponibilité, elle possède une bonne conductivité thermique et son entretien se fait à faible coût. Compte tenu de ces avantages, la terre est préférentiellement utilisée pour la construction notamment dans les zones rurales (Vandna et al, 2015). Autrement dit la terre est un matériau composite disponible et peu couteux, vue que ces différents constituants sont localement abondants.

Dans un contexte économique comme celui du Bénin marqué par le faible pouvoir d'achat des populations, il va falloir rechercher à proximité des matériaux locaux abondants comme la terre, mais négligés du fait que leurs caractéristiques géométriques et leurs comportements ne soient pas maitrisés pour substituer aux matériaux composites modernes utilisées de nos jours, pour palier au problème économique des populations surtout celles rurales.

1.3.1. La construction en terre dans le monde :

La terre est utilisée dans des territoires extrêmement différents depuis les plus hautes régions du monde comme au **Tibet** ou dans **les Andes au Pérou**, jusqu'au territoire les plus bas comme au bord du **Nil** en **Egypte** ou dans les vallées fertiles de **Chine le long du Huanghe**. Elle est utilisée sur tous les continents comme matériau de construction depuis plus de onze millénaires comme on le peut le voir sur cette carte réalisée par le CRATerre **(Figure I.2),** on considère qu'environ 30% de la population mondiale vit dans un habitat en terre, pour environ 1.5 milliards d'habitants. Pour les pays en voie de développement, cela représente environ 50% de la population rurale et 20% pour en région urbaine. En **Inde**, le recensement de 1971 indiquait un parc immobilier construit à 72% en terre.

Selon l'Auroville Earth Institute, il y a environ 1,7 milliards de terriens qui résident dans un bâtiment en terre. D'autres études estiment « qu'au minimum 30 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17 % des constructions inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des œuvres architecturales en terre » **(ANGER & FONTAINE, 2009).**En France, l'agence nationale d'amélioration de l'habitat (**ANAH**) estimait en 1980 que le nombre de bâtiments construits en terre représente 15% du patrimoine architectural. Cela repré-

sente 2 400 000 bâtiments et plus de 8 millions pour l'ensemble de l'Europe. Quoi qu'il en soit, la terre représente une partie importante des matériaux d'architecture utilisés dans le monde **[3].**



Figure I.02: Architecture de terre dans le monde (Source : http://craterre.org/)

1.3.2. La construction en terre dans l'Algérie [4]

L'Algérie recèle d'un important patrimoine d'architecture de terre crue qui remonte à des millénaires. Historiquement, la terre crue a été utilisée aussi bien dans la construction d'édifices prestigieux tels que les palais, les édifices religieux et militaires que dans l'architecture domestique. Cette architecture qui fait partie intégrante des paysages ruraux et des cités urbaines des différentes régions de l'Algérie adopte différentes techniques constructives, tels que : le pisé, le torchis, l'adobe et la bauge.

À l'instar de différentes régions d'Algérie, les villes de la région Nord, notamment Cherchell, Alger et Bejaia recèlent de ces pratiques constructives dans des édifices de différentes périodes historiques.

À travers une étude diachronique qui a essayée d'identifier et de comprendre le processus d'évolution de la construction en terre crue dans la région du Nord de l'Algérie entre le XVe et le XVIIIe siècle, ainsi que de déterminer les savoirs faires empruntés à d'autres cultures et ceux transférés d'une région à l'autre. Ces savoirs faire sont indicateurs des grandes lignes de l'histoire de la construction en terre crue en Algérie et des différents courants d'influence qui l'ont conditionnée. [4]

1.3.3. Réglementation de l'utilisation de la terre dans la construction :

Dans le but de la propagation de l'utilisation de la terre à grande échelle pour sa plus grande acceptabilité par tous, des normes et des dispositions légales ont été formulées pour la planification, la conception et les lignes directives concernant son utilisation. La mise en application de ces normes et dispositions légales pour tous les travaux de construction en terre est obligatoire dans certains pays et facultative dans d'autres.

Le tableau ci-dessous indique certaines normes disponibles pour les travaux de construction en terre dans certains pays**[5].**

Tableau .I.1: Normes pour les constructions en terre dans certains pays (**Middleton, 1992;Torgal and Jalali, 2012**).

S.N	Country	Relevant guideline/code
1	United States	ASTM International: 2010 – Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems (ASTMD 559-57)
2	New Zealand	SNZ : Standards New Zealand (NZS 4297 :1998, NZS 4298 :1998, NZS 4299:1998)
3	New Mexico	State Regulations "Rammed Earth And Adobe Based Construction" – 1999 (CID : NMAC 1474)
4	Spain	AENOR : Spanish Association For Standardization And Certification 2008 (UNE 41410:2008-12-10)
5	Columbia	ICONTEC, 2004 (NTC 5324)
6	Australia	Australian Regulations "Bulletin 5" – 1952 by CSIRO Replaced by "Australians Earth Building Handbook" 2002
7	South Africa	ARSO : African Regional Standards : 1996 (ARS 670, ARS 683)
8	Kenya	KEBS : Kenya Bureau of Standards (KS 02-1070)
9	Tunisia	INNORPI : Tunisien Standards : 1996 (INNORPI: NT 2133, INNORPI: NT 2135)
10	France	AFNOR : 2001 (AFNOR : XP P13-901)
11	India	IS 13827 :1993, IS 1725 1982 (reaffirmed 2002), General Building Construction, NBC Handbook (IS 1725 1982)

1.3.4. Avantages de la construction en terre :

La terre présente plusieurs avantages, il est considéré comme :

- **M**atériau le plus approprié pour construire moderne, durable.
- Matériau disponible et facile à la mise en œuvre, sa résistance au feu est aussi un avantage lié à son utilisation.
- **M**atériau qui a une forte capacité de rétention thermique ce qui assure l'échange de température ou de flux de chaleur entre le milieu intérieur et extérieur, lui permettant de maintenir à l'intérieur du logement une ambiance fraiche quand il fait chaud à l'extérieur et vis-versa. Les murs en terre se sont avérés être de meilleurs isolants thermiques par rapport aux murs en béton de brique ou de béton de ciment (Binici, 2007).
- **M**atériau à faible consommation d'énergie, son utilisation en tant que matériau de construction contribuera à l'atténuation du CO2 dans l'environnement. En plus la brique de terre n'a pas besoin d'être cuite, elles restent crues, contrairement aux briques rouges qui sont cuites dans des fours à haut température. Ceci rend l'habitat en terre, plus respectueuse des normes environnementales.
- **M**atériau à un coût moins élevé que les autres matériaux et ne représente que 66% du coût de construction conventionnel (Tiwari, 1996). Son faible coût pour la construction est donc un facteur avantageux pour les populations à faible revenu.

1.3.5. Inconvénients de la construction en terre :

La terre en tant que matériau de construction comparé au ciment présente quelques désavantages comme :

- Sa faible résistance à la compression ;
- Sa faible résistance à la perméabilité ;
- Son fort taux de retrait-gonflement ;
- Sa faible résistance à l'abrasion ; la nécessité de sa fréquente maintenance.

Il faut noter également qu'il n'existe pas de façon obligatoire des normes pour l'utilisation de la terre comme matériau de construction. [**6]**

1.4. Techniques d'utilisation de la terre en construction

En se basant sur le patrimoine mondial des traditions de construction en terre crue, on recense un grand nombre de techniques de construction en terre crue, avec de nombreuses variantes selon les propriétés géotechniques de la terre. Selon les études menées par le groupe CRA Terre, douze techniques de construction en terre crue sont répertoriées, dont huit Principales d'usage courant **(Figure I.3)** [7].

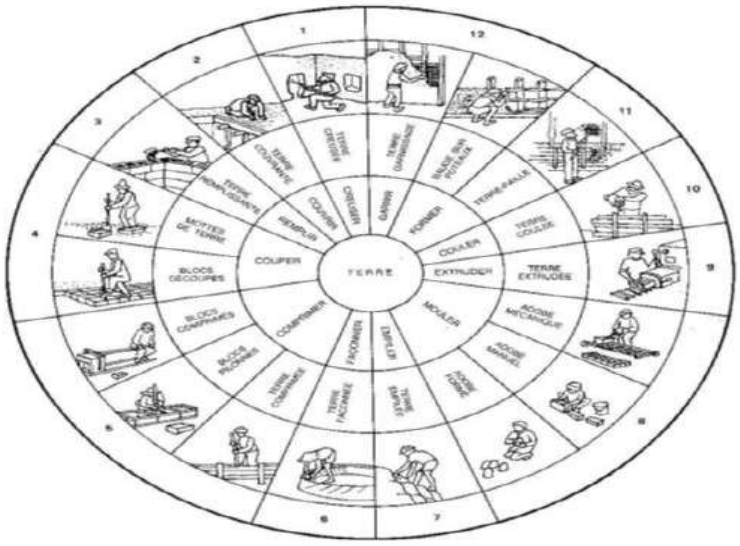


Figure I. 3 : Schéma des différentes techniques de construction en terre CRA Terre

1.4.1. La bauge :

Ce procède consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses. Les murs sont constitués d'une succession de couches de terre dites levées généralement d'une soixantaine de centimètres de hauteur. Montée la plupart du temps a la fourche, la levée encore meuble est compactée au bâton, éventuellement taillée au paroir, avant d'être lissée ou décompactée selon le type de mise en œuvre, il faut ensuite une à quatre semaines de séchage avant de pouvoir mettre en place la levée suivante pour laquelle un nouveau mélange d'eau, de terre et de fibres doit être réalise. Selon la granularité de la terre, l'élasticité du mélange et le savoir-faire du maçon, la hauteur des levées peut varier entre cinquante centimètres et un mètre vingt, la largeur entre cinquante centimètres et quatre-vingt centimètres **(Figure I.4)**



Figure I. 4 : Construction d'un mur en bauge. [*http://empreinte.asso.fr/la-bauge*]

1.4.2. Le torchis :

Le torchis est une technique de remplissage en terre crue, il s'agit d`une structure porteuse en bois garnie de terre a l'état plastique, le plus souvent mélangée avec des fibres de paille. Torchis vient de tordre, de torche, car sa pose traditionnelle consiste à poser de la paille ou du foin torsade dans une boue ou pâte de limon argileux sur des éclisses ou des gaulette s'entre les colombages. On peut distinguer deux grands types de mélange :

- ***Le torchis lourd*** : beaucoup de terre et un peu de paille formant une armature. Sa conductivité thermique est de λ = 1,05 W/m.°C. Il a une masse volumique de 1400 kg/m3 (1800 kg/m3 humide). Il privilégie l'inertie et l'accumulation thermique (chaleur l'hiver ou fraicheur l'été).
- ***Le torchis allège*** : beaucoup de paille et un peu de terre. Sa conductivité thermique est de λ= 0,12 a 0,15 W/m.°C. Il a une masse volumique de 300 à 400 kg/m3. Il privilégie donc l'isolation, et il est 9 fois plus isolant que le torchis traditionnel car il renferme une forte porosité **(Figure I.5).**



Figure I. 5: Construction d'un mur en torchis. (Middleton, 1992; Torgal and Jalali, 2012).

1.4.3. Terre-paille :

Cette technique consiste à disperser la terre dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange a la paille afin de former un film sur chaque brin. Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banche pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse **(Figure I.6).**



Figure I.6 : Maison en terre paille. (Enquête paille Broustey)[***http://empreinte.asso.fr/ecohabitat/la-paille***].

1.4.4. Les Adobes :

L'adobe est de l'argile mélangée à de l'eau et a une faible quantité de paille hachée, et qui peut être façonnée en briques séchées au soleil. Par extension, l'adobe (ou banco) est la brique de terre crue, moulée et séchée au soleil, et utilisée comme matériau de construction. Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilises au monde. Les briques d'adobe sont coulées dans un cadre ouvert rectangulaire. Le moule est retiré, et la brique est mise à sécher quelques heures, puis elle est disposée sur la tranche pour terminer le séchage.

Lors du séchage, les briques peuvent être placées à l'ombre pour éviter l'apparition de fissures. L'adobe sert aussi à remplir des tubes de textile (colombin d'adobe) qui, tassés sur place et réunis verticalement par des piquets, permettent de monter des murs et de supporter une charpente **(Figure I.7).**



Figure I.7 : (a) et (c) Technique de fabrication de l'adobe
(b) Maison en adobe en construction [**2013**]**.**

1.4.5. Le pisé :

Le pise est un procède de construction de mur en terre crue, compactée dans un coffrage en couches successives à l'aide d'un pilon. Le mur est décoffre immédiatement après que la terre a été damée **(Figure I.8).**



Figure I.8 : Etape d'exécution d'un mur en pise [***Gar, 2012***]**.**

1.4.6. Les blocs de terre comprimée (BTC) :

Les blocs de terre comprimée qui sont des formes évolutives et modernisées des blocs d'adobe font partie des techniques de construction en terre crue les plus récentes. Au lieu qu'ils soient moulés à la main dans un cache en bois, les blocs sont obtenus par compactage de la terre légèrement humide dans un moule métallique au moyen d'une presse. Comparés aux adobes, les BTC présentent une meilleure résistance à la compression et une insensibilité à l'eau plus élevée **[7]**.

En effet ils ont été mis en œuvre pour la première fois en **Colombie** vers les années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural. Par contre, l'intention de compacter la terre dans le but d'améliorer sa résistance mécanique s'est fait déjà ressentir depuis le temps ancien à travers la formulation des blocs de terre moulée compressée à l'aide de pilon de bois.

Ce procède est encore utilisé dans le monde rural. Les premières machines à comprimer la terre auraient été imaginées au XVIIIe siècle, mais les premières presses méca-

niques ont vu le jouent début du XXe siècle. A l'heure actuelle ces presses ont été modernisées.

L'industrie de la brique crue a ensuite utilisé des presses à compression statique où la terre était comprimée entre deux plateaux. Le développement significatif de l'emploi des presses et de l'utilisation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée n'a été finalement engagé qu'à partir de 1952 suite à l'invention de la fameuse petite presse CINVA-RAM, imaginée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre CINVA de Bogota, en Colombie.



Figure I.9 : Brique de terre comprimée

Vers les années 1970 et 1980, d'autres générations de presses (presse manuelle, mécanique, hydraulique, motorisée) ont été mises sur le marché. A l'heure actuelle on assiste à un véritable développement du marché de la production et de l'utilisation des blocs de terre comprimée **[7] (Figure I.9).**

1.4.7. Diversités des produits de blocs de terre comprimée « BTC »

Les dimensions courantes des blocs de terre comprimées « BTC » sont adaptées à une grande souplesse d'emploi dans des solutions constructives variées, en maçonneries porteuse ou renforcée et en maçonneries de remplissage. Les briques de terre comprimée permettent aussi la réalisation de structures particulières (arcs, coupoles et voutes), pour des constructions à usage d'habitation ou industriel **(Figure I.10)**.



Figure I.10 : Différents produits de blocs de terre comprimée

1.4.8. La construction en BTC dans le monde et en Algérie :

Plusieurs constructions ont été réalisées en BTC à travers les quatre coins du monde, profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. Voici quelques exemples fascinants :

- Centre de l'architecture de terre au Mali **(Figure I.11),**



Figure I.11 : Centre de l'architecture de terre au Mali

- Les logements semi-collectifs R+1 à Sidi Bel Abbes en Algérie **(Figure I.12),**



Figure I.12 : Logements collectifs R+1 à SidiBel Abbes (Algérie)

- L'atelier électronique en Inde voir **(Figure I.13),**



Figure I.13 : Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde

1.5. Stabilisation des sols :

La stabilisation des sols regroupe l'ensemble des techniques permettant d'améliorer les caractéristiques physicochimiques, mécaniques et hydriques des sols. Elle doit permettre ;

- La réduction de la porosité ;
- La diminution du retrait et gonflement ;
- L'obtention d'une meilleure cohésion ;
- L'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface ;
- L'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement, On distingue trois principales techniques de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique).

1.5.1. Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est pratiquée lorsqu'on procède à la densification d'un sol par compactage. Elle a pour effet la diminution de la porosité de la terre. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mis au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression. C'est pourquoi le compactage est un moyen de déstabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisa-

tion chimique. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la granularité de la terre.

1.5.2.1. Mode de compactage :

On distingue essentiellement quatre principales méthodes de compression :

- Compression statique,
- Compression dynamique par vibration,
- Compression dynamique par impact
- Compression par pétrissage.

A chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre [08]. Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance plus importante de l'ordre de 50 % par rapport à la vibor-compression et d'environ 20 % par rapport à la compression statique [09].

1.5.2.2. Contrainte de compactage ;

Quels que soient le type de terre et la méthode de compactage utilise, une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale (TEO), et conduit à une plus grande densité sèche, comme le montre la (**Figure I.14)** [10,11, 12].

Toutefois, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau. Ainsi, à la presse, les très fortes pressions peuvent pro laminé les blocs fabriqués [12,13].

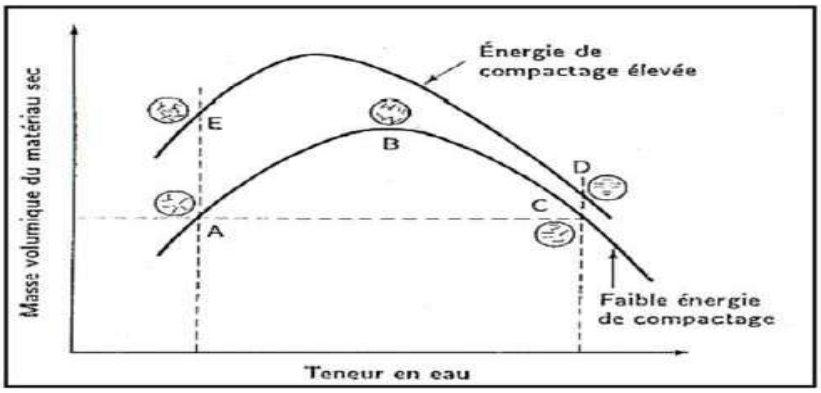


Figure I.14 : *Effets du compactage, en fonction de l'énergie de compactage, sur la Structure du sol* ***[14]***

Guettala et al. (2002) [39] ont montré dans leurs travaux sur les blocs de terre stabilisés que les résistances mécaniques augmentent en fonction de la contrainte de compactage jusqu'à un optimum de 17.5 Mpa, au-delà duquel il y a une chute de résistance mécanique**(Figure I.15).**

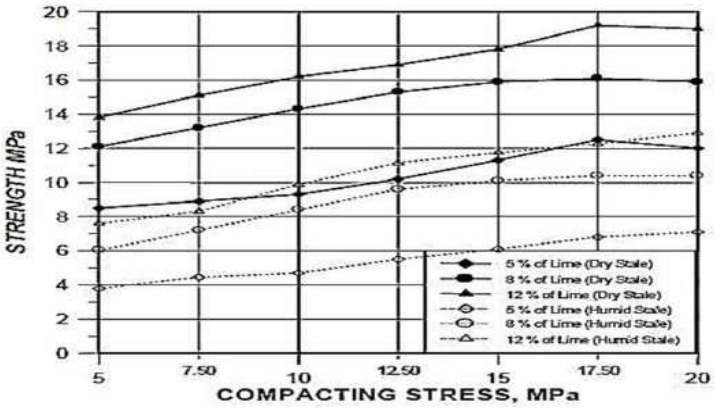


Figure I.15 : Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur Les résistances mécaniques) **[11]**

1.5.2.3. Influence de la teneur en eau sur la densité :

La densité d'un bloc de terre comprimée dépend de plusieurs paramètres physiques : la densité des particules de sol, la granularité, la teneur en eau, la méthode de compactage et la contrainte de compactage. On relève que les propriétés de la terre comprimée sont plus influencées par la teneur en eau que par tout autre paramètre [15]. Presque tous les sols présentent une relation similaire entre la teneur en eau et la densité sèche lorsqu'ils sont compactes **(Figure I.16)**[10]. La compacité maximale d'un sol est atteinte lorsque son indice de vides est au minimum, cet état est atteint pour une teneur en eau du sol dite optimale. Un sol [trop sec] sera le siège de frottements importants entre les grains de sol. Un sol trop humide, par contre, sera moins susceptible d'être compacte car une partie importante de l'énergie de compactage sera absorbée par l'eau (incompressible) et ne sera donc pas communiquée aux grains de sol**.**

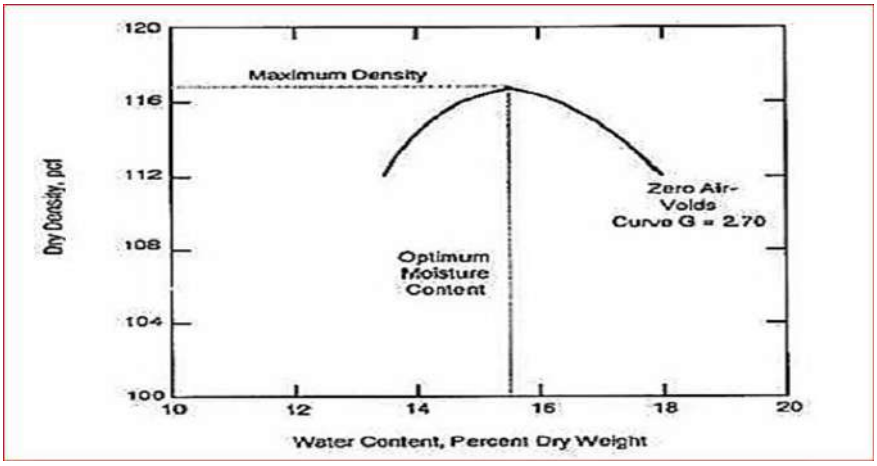


Figure I.16 : Relation typique entre la teneur en eau- densité [10].

Dans le cas de la formulation des BTC, la détermination de la teneur en eau optimale (TEO) est faite en laboratoire. En géotechnique routière, la recherche de la TEO est obtenue à l'aide de l'essai de Proctor, qui procède par compactage. Cet essai n'est pas conseillé pour les sols argileux, car il entraine une saturation localisée de l'éprouvette au droit de la dame de compactage. Il en résulte une éprouvette hétérogène en termes de densité [16].

Mesbah et *al.* (1999) [17], ont montré qu'un compactage statique est mieux adapté aux sols argileux. En conséquence, l'essai Proctor s'est avéré peu utilisable et non représentatif des conditions de fabrication des BTC. En effet, d'autre part, il est à peu près impossible de fabriquer des éprouvettes à partir du moule Proctor, mais surtout, il a été démontré qu'il n'existe pas de relation entre [l'énergie Proctor] et celle d'un compactage statique utilisé dans la fabrication des blocs [18]. Il est préférable de procéder comme sur chantier, c'est-à-dire rechercher la teneur en eau optimale avec la presse à bloc directement [19].

1.5.2. Stabilisation physique

On distingue deux manières de procéder à une stabilisation physique :

- Modification des propriétés des sols pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la granularité du sol, le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.
- Ajout de fibres végétales a des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage. Izemmouren et Guettala (2014) [19], ont étudié l'influence du taux de sable sur la durabilité des briques de terre comprimée. Deux types de sables concassés ont été utilisés pour la stabilisation par correction de la granulométrie du sol. Les résultats ont montré que les résistances mécaniques à l'état sec et humide augmentent en fonction du taux de sable. Cependant, la teneur en sable n'a pas un effet significatif sur l'absorption totale **(Figure I.17).**

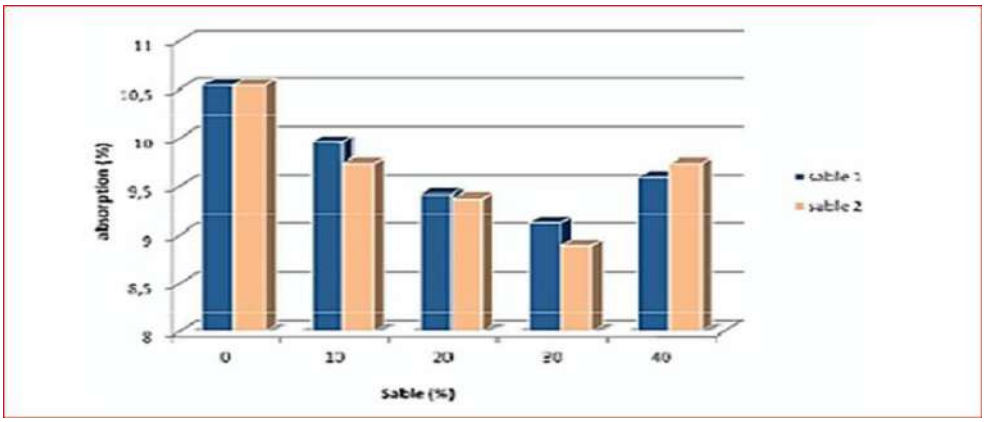


Figure I.17 : Absorption totale en fonction de la teneur en sable. [21]

1.5.3. Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certain ajouts, afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, On a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété.

1.6. Renfoncement des matériaux composites par des fibres :

Depuis l'Antiquité, l'homme a élaboré des matériaux composites par combinaison de matières de natures différentes dans le but d'obtenir des matériaux aux propriétés spécifiques. De nombreux matériaux naturels lui ont fourni des modèles, tel que l'os rigide mais léger, forme de fibres de collagène dans une matrice minérale d'apatite dure et fragile, ou le bois souple mais résistant formé d'un réseau de micro fibrilles de cellulose cimentée dans une matrice d'hémicelluloses, de pectines et lignine [21, 22].

La famille des matériaux composites renforcés par des fibres, apparue dans les années 1940, n'a cessé de se développer en raison de leurs propriétés mécaniques associées souvent à une faible densité. Aussi, leur bon rapport cout/performance leur a ouvert une très large gamme d'applications dans des domaines varies ; l'industrie aérospatial, automobile, maritime, ferroviaire, le bâtiment, l'ameublement, la décoration, etc. [23].

Toutefois, même si le développement des composites est qualifié de prometteur, cette progression est néanmoins jalonnée de quelques contraintes à surmonter, par exemple celles liées à l'environnement, l'hygiène et la sécurité. La valorisation des matériaux composites classiques avec leur armature en fibres de verre, d'aramide, ou bien de carbone pose un grand problème leur fin de vie. Pour y pallier les fibres naturelles sont de mise. Elles sont issues de ressources renouvelables et elles sont biodégradables. Elles sont moins irritantes pour la peau et le système respiratoire des personnes qui les manipulent. Par ailleurs les fibres naturelles ont une densité plus faible que les fibres minérales [24, 25]. En effet le faible coût et les propretés mécaniques spécifiques élevées des fibres végétales sont des avantages essentiels. Cependant, leur aptitude à absorber l'eau en grande quantité et leur faible tenue en température constituent les points faibles de l'utilisation de ces fibres [26].

1.6.1. Les fibres végétales :

Les fibres végétales sont des matériaux filamenteux issus de la biomasse. Elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante cultivée, des arbustes et des herbes. Susceptibles d'être filées pour fabriqués des fils et des cordes, elles sont tissées, tricotées ou tressées pour confectionner des textiles. La fibre végétale présente une variabilité importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des filaments végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut-être très importante le long de la même fibre végétale [27].

Les fibres végétales sont également caractérisées par la diversité de l'épaisseur de leur paroi cellulaire résultant de la porosité fibreuse [28].La forme morphologique de la fibre végétale peut également être un facteur important dans la compréhension du transfert de contrainte aux interfaces fibre-matrice [29].

1.6.2. Différents types de fibres végétales :

Il existe une grande variété de fibres végétales qui peuvent être utilisées comme renforcement des matériaux composites. Elles sont classées suivant leur provenance et leur forme **(Figure I.18).**

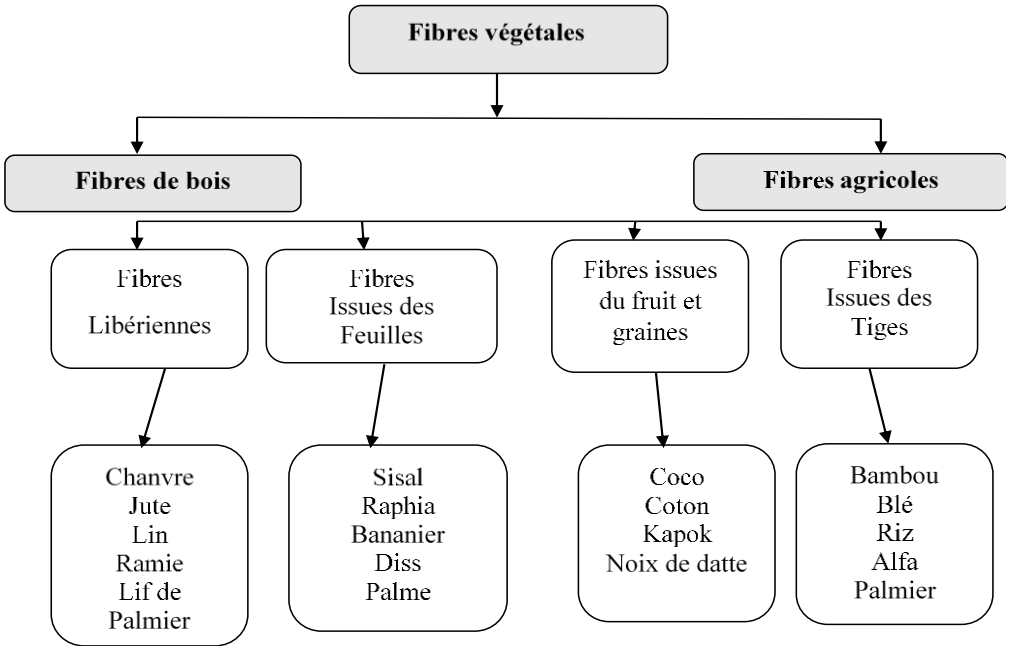


Figure I.18 : Classification des fibres végétales

1.6.2.1. Fibres de jute :

Le jute sont des arbustes de 2 à 4 m de haut, à tige rigide et fibreuse de 2 cm de diamètre environ, et ramifiée seulement dans la partie supérieure. Les feuilles, longuement pétiolées, à limbe triangulaire font 10 à 15 cm de long sur 5 cm de large **(Figure I.19)**. Le Jute se situe en sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'inde, le Bangladesh et la chine. Les composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres de jute ont été utilisés dans l'industrie en Allemagne pour fabriquer les portes en panneaux composites.



Figure I.19 : Le jute [32, 33]

La fibre de jute est utilisée par les tireurs d'élite pour créer un filet de la forme d'un vêtement. Ce type de vêtement de camouflage est appelé une Ghillie. Diverses recherches ont été réalisées sur ces composites, ces études ont porté notamment sur la stabilité thermique, la cristallinité, la durabilité, l'orientation des fibres, le frottement à l'usure, et l'éco conception des composants automobiles [30].

1.6.2.2. Fibres de chanvre :

Le chanvre est une variété de plante cultivée. C'est une plante annuelle de la famille Cannabis **(Figure I.20).**



Figure I.20 : Le chanvre [34]

Les principaux producteurs sont la France et l'Italie. Cependant les fibres de Chanvre sont très recherchées comme renfort dans les composites à matrice thermoplastique à cause de sa grande rigidité et de son intérêt économique. Elles sont appliquées dans les structures internes, les pièces automobiles et les matériaux de construction.

1.6.2.3. Fibres de sisal :

Le sisal est le nom de la fibre extraite des feuilles d'une plante appelée l'Agave Constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2m de Long **(Figure I.21).** L'originaire de l'est du Mexique, cette fibre sert à la fabrication de Cordage, de tissus grossiers et de tapis.



Figure I.21 : Le sisal [35]

1.6.2.4. Fibres de lin :

Le lin est une plante cultivée dans les régions tempérées.



Figure I.22 : Le lin

Il se présente sous l'aspect d'une tige unique pouvant atteindre une hauteur voisine de 1m pour un diamètre de l'ordre de 2 mm. Sur cette tige se répartissent 80 à 100 feuilles simples.

La fibre de lin est la plus ancienne au monde, elle est trouvée dans la grotte de Géorgie, les pays Asiatique centrale et l'Egypte (**Figure I.22**).La fibre de lin est parmi l'une les fibres naturelles utilisée comme renfort dans les composites à matrice thermoplastiques pour les structures internes dans l'industrie automobile. En 1941, ces composites ont été utilisés pour fabriquer les carrosseries des Voitures Henry Ford, pour avoir une résistance 10 fois plus élevée que l'acier sous l'impact [30].

1.6.2.5. Fibres de ramie :

Le nom scientifique de la Ramie est Boehmerianivea. C'est une plante vivace herbacée de 1m à 2,5 m de haut, avec des feuilles de forme de cœur, de 7 à 15 cm de longueur et de 6 à 12 cm de large et de couleur blanches sur la face inférieure avec des petits poils denses.

Aujourd'hui, la ramie est principalement cultivée en Chine, Brésil, Philippines, Inde, Corée Du Sud, Thaïlande et États-Unis d'Amérique. Les fibres de ramie ont une longueur moyenne comprise entre 40 et 250 mm, un diamètre moyen de 45µm. Ces fibres sont utilisées comme renforts dans les composites à matrice polyester, époxy et polypropylène (**Figure I.23**).



Figure I.23 : La ramie **[37]**

1.6.2.6. Fibres d'Alfa :

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse

spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfas 'arrête.

La fibre d'alfa est généralement employée dans la fabrication du Papier de haute qualité mais aussi utilisée pour la fabrication de cordages, d'espadrilles, de Tissus grossier, tapis et panier. Les principaux producteurs sont : Algérie (4.000.000 ha), Maroc (3.186.000 ha), Tunisie (600.000 ha), Lybie (350.000 ha) et Espagne (300.000 ha)[37](**Figure I.24**).

.



Figure I.24 :l'Alfa **[39, 40]**

1.6.3. Structure d'une fibre végétale :

Les charges à base de cellulose sont des matériaux simples, chimiquement et physiquement. Si l'on ignore l'eau absorbée, les principaux constituants des renforts à base de cellulose se composent de trois types de produit chimiques : environ la moitié de celle-ci est la cellulose et environ un quart de celle-ci est l'hémicelluloses et la lignine. Elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions [40].

Les constituants majoritaires des fibres Lignon-cellulosiques déshydratées sont la cellulose, les hémicelluloses et les lignines **(Figure I.25).**

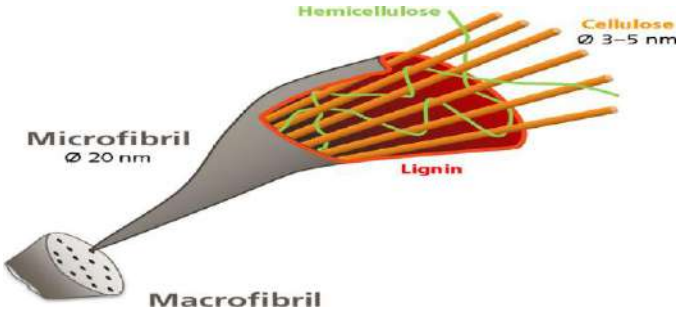


Figure I.25 : Structure schématique d'une fibre végétale [42].

1.6.3.1. La cellulose :

L'existence de la cellulose comme matériau commun dans les parois cellulaires végétales était d'abord découverte par Anselme Payen en 1838 [42]. La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur terre. D'un point de vue chimique, la cellulose est une macromolécule constituée par une très longue chaîne stéréo-régulière composée de maillons de glucose C6H12O6 **(Figure I.26).**

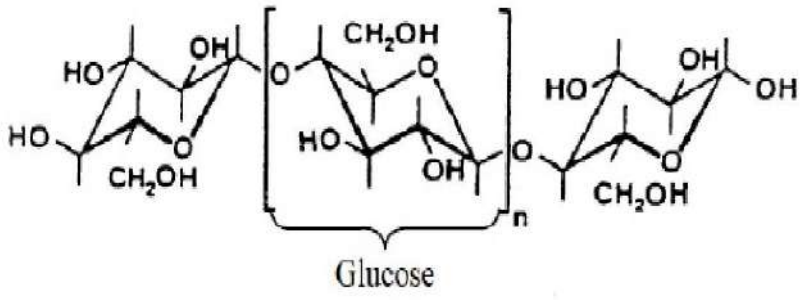


Figure I.26 : Molécule de la cellulose [4rb4]

La cellulose possède une structure fibrillaire et partiellement cristalline. Les micro-fibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines ordonnées et de zones amorphes totalement désordonnées. Dans la zone cristalline, les chaînes cellulosiques sont disposées parallèlement les unes aux autres, liées par des liaisons hydrogènes intra et intermoléculaires. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons hydrogène qui se développent

entre les chaînes. Les interactions moléculaires sont fortes et assurent l'essentiel de la cohésion tout en empêchant la pénétration des réactifs. Grâce à sa grande cohésion, la cellulose est insoluble dans la plupart des solvants. La cellulose est de nature très hydrophile [40].

Dans la plupart des fibres naturelles, la cellulose est mélangée à des hémicelluloses qui sont également des polysaccharides composés d'une combinaison de cycles à 5 et 6 carbones **(Figure I.27).**

1.6.3.2. L'hémicellulose

L'hémicellulose forme la matrice de support des micro-fibrilles de cellulose. L'hémicellulose diffère de la cellulose par trois aspects. Tout d'abord, elle est composée de :

- sucres neutres : xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose, et d'acides uroniques alors que la cellulose ne contient que des unités 1,4-βD-glucopyranose.
- Deuxièmement, elle présente un degré considérable de branchements contenant des groupes latéraux à l'origine de sa nature non-cristalline.
- Enfin, à l'état naturel, elle a un degré de polymérisation compris entre 50 et 300, tandis L'hémicellulose est très hydrophile, soluble en milieu alcalin, et facilement hydrolysable Dans les acides [40, 43].

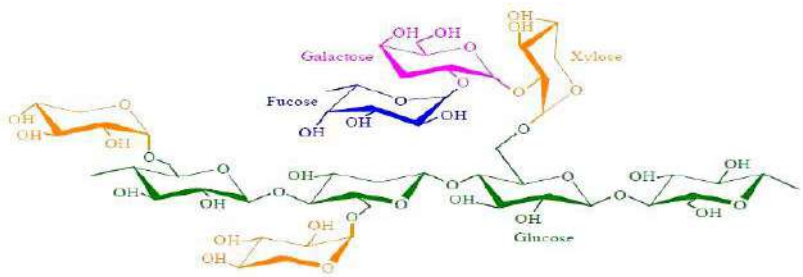


Figure I.27 : Structure d'un type de xyloglucane [45]

1.6.3.3. Les lignines

La lignine est une macromolécule extrêmement hétérogène composée de polymères aromatiques. Elle représente, après les polysaccharides, le polymère naturel

le plus abondant sur terre. Elle participe à la rigidité structurale des parois cellulaires et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes. La lignine est une molécule à trois dimensions composée d'unités de phényle propane et les unités primaires (mono-lignons) constituant la lignine sont l'alcool conifférylique, l'alcool sinapylique et l'alcool p-coumarylique **(Figure I.28).** Au cours du processus de lignification, des phénols oxydases végétales telles que les laccases interviennent et permettent la polymérisation des différentes unités élémentaires.

Une fois synthétisée, les lignines s'associe avec les différents polysaccharides pour former une matrice constitutive de la paroi végétale [43, 45].La lignine est totalement amorphe et hydrophobe. Elle n'est pas hydrolysée par les acides, mais soluble à chaud dans la soude, facilement oxydée et facilement condensable avec du phénol [43].

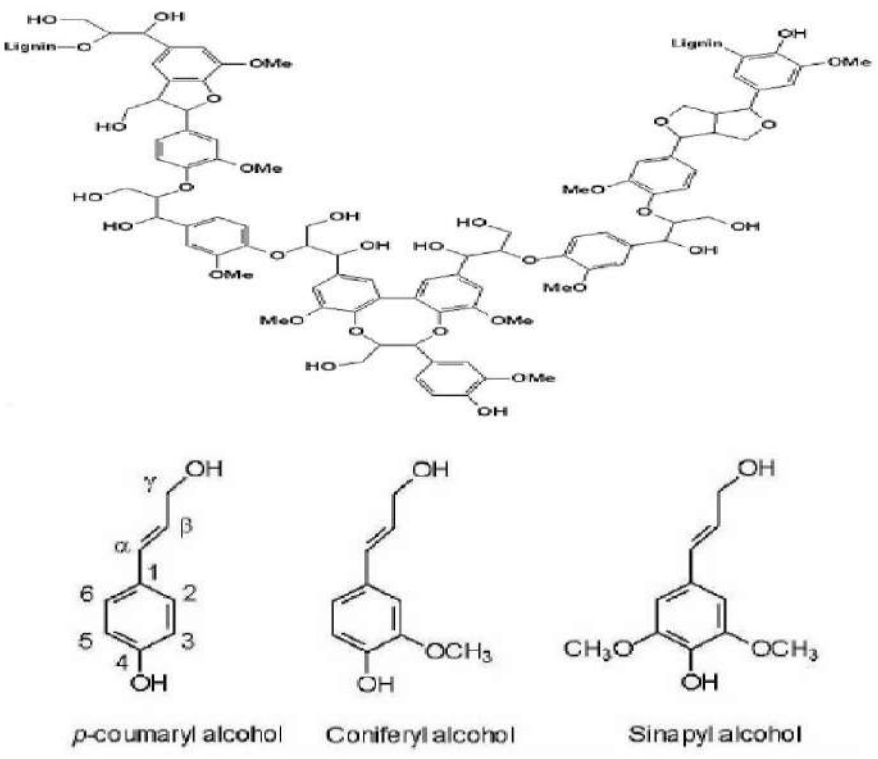


Figure I. 28 : Représentation schématique et la structure des précurseurs de la lignine [44]

1.6.4. Composition chimique des fibres végétales :

La composition chimique de certaines fibres végétales est présentée sur le tableau suivant :

Tableau I.2: Composition chimiques de quelques fibres végétales [43] [46]

Fibres	Celluloses (wt%)	Hémicelluloses (wt%)	Lignines (wt%)	Pectines (wt%)	Réf
Lin	60-81	14-18.6	2-3	1.8-2.3	
Jute	51-72	12-20.4	5-13	0.2	
Sisal	43-88	10-12	4-12	0.8-2	
Chanvre	70-78	17.9-22	3.7-5	0.9	
Kenaf	36	21	18	2	
Ramie	68.6-76	13.1-15.0	0.6-1	1.9-2	
Coton	82.7-90	2-5.7	0.5-1	5.7	
Bois	45-50	23	27	-	
Palmier dattier	41-45	6-10	30-40	-	

1.6.5. Propriétés physico-mécaniques des fibres végétales :

Les fibres végétales sont d'une manière générale de bons renforts pour les matrices thermoplastiques ou thermodurcissables à cause de leur résistance relativement grande et leur faible densité. Certaines caractéristiques des fibres de Chanvre et des fibres de Lin Atteignent des valeurs très proches de celles des fibres de verre "E" (Tableau 03).

Tableau I.3 : Propriétés physico-mécaniques des fibres végétales comparées aux renforts Synthétiques **[47, 48]**

Fibres	Masse volumique (g/cm^3)	Résistance (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement (%)
Lin	1.4	88-1500	60-80	1.2-1.6
Chanvre	1.48	550-900	70	1.6
Jute	1.46	400-800	10-30	1.8
Ramie	1.5	500	44	2
Coir	1.25	220	6	15-25
Sisal	1.33	600-700	38	2-3
Abaca	1.5	980	-	-
Cotton	1.51	400	12	3-10
Kenaf (bast)	1.2	295	-	2.7-6.9
Banana	1.35	355	33.8	53
Coco	1,2	175	4,0-6,0	30,0
Verre-E	2,5	2000-3500	70,0	2,5
Verre-S	2,5	4570	86,0	2,8
Aramide	1,4	3000-3150	63,0-67,0	3,3-3,7

1.6.6. Traitements des fibres végétale

Afin de stabiliser la fibre végétale, trois classes de traitements peuvent être répertoriées dans la bibliographie ; physique, chimique et thermique :

1.6.6.1. Traitement physique

Les produits les plus utilisés dans ce type de traitement sont : les huiles, les paraffines et les résines. Ont montré que le polyéthylène glycol (PEG) permet de diminuer le retrait d'un facteur 10 avec des résistances mécaniques inchangées. Des échantillons traités avec 15 à 20% de PEG présentent un retrait définitif de 0.1% à 56 jours [49].

1.6.6.2. Traitement chimique

Les traitements chimiques ont certainement été les plus étudiés dans le monde, Certain nombre d'études ont mis en évidence que la technique de traitement par des solutions chimiques des fibres végétales peut jouer un rôle plus important sur les propriétés mécaniques des composites avec ce type de fibres et augmente l'adhérence entre les fibres et la matrice. Broker et al ont comparé l'effet de l'immersion de fibre de sisal et de coco dans l'eau à PH=8.3, dans une solution de chaux $Ca(OH)_2$ à PH=12 et dans la soude NaOH à PH=11 pour distingue, d'une part l'effet du PH et d'autre part celui de la présence des ions calcium sur la surface des fibres végétales après l'immersion. [50]

Baley et all ont à leurs tour étudié l'influence de différents traitements chimiques (soude, acide formique, anhydride acétique) sur la liaison (fibres de lin-résine polyester), et ont comparé avec le système (verre-polyester) et la caractérisation inter faciale a été réalisée par déchaussement d'une fibre unitaire d'une microgoutte de matrice pour déterminer la contrainte apparente de cisaillement inter faciale et l'énergie critique de rupture. Les résultats obtenus montrent qu'il ya une augmentation très importante de la liaison (fibre de lin-résine) après les traitements. [51]

Claire et all ont étudié l'impact de différents traitements chimiques (NaOH, EDTA, eau saturée en chaux et une solution de polyéthylène) sur des fibres de

chanvre, et ont trouvé que le traitement par la soude augmente l'indice de cristallinité des fibres, diminue le temps de prise et augmente la rigidité expérimentale des composites. Le traitement par EDTA, qui augmente également la contrainte à la rupture des composites, et les deux autres traitements ont peu d'influence sur les propriétés mécaniques [52].

Bahloul et all. Ont procédé à un traitement par la soude NaOH des fibres d'alfa à des pourcentages différents (20%-25%) pendant 48H, et ont trouvé que les résultats finaux sont meilleurs par rapport aux mélanges avec des fibres non traitées [53].

Troëdec a renforcé les composites par les fibres de chanvre, et ces fibres ont été soumis à des traitements chimiques alcalins :

- Le premier traitement avec l'hydroxyde de sodium NaOH avec un PH=12.8.
- Le deuxième traitement avec un agent complexant, il s'agit de l'acide éthylène-diamine-tétra étique (EDTA) à un PH=11.
- Le troisième traitement avec l'eau de chaux $Ca(OH)_2$ à un PH=12.8.

Ces traitements alcalins ont donné des meilleurs résultats pour les composites renforcés par ce type de fibres. [54]

Rokbi et all. Ont traité aussi les fibres d'alfa par la soude NAOH avec différentes concentrations (1, 5 et 10%) durant 0h, 24h et 48h, et les résultats obtenus montrent que la résistance et le module de flexion des composites renforcés par des fibres traitées à 10% de NaOH durant 24h s'améliorent de l'ordre de 62% comparés à des composites renforcés par des fibres non traitées [55].

1.6.6.3. Traitement thermique

Le traitement consiste à chauffer les fibres de bois, sous atmosphères inerte jusqu'à 280°c et de le maintenir suffisamment longtemps pour que sa structure soit modifiée et cette méthode appelée (la torréfaction). Donc le procédé a été adapté, il consiste à traiter thermiquement du bois sous atmosphère inerte à des températures inferieurs à 280°c. La durée du traitement permet l'obtention de propriétés souhai-

tées. Il présente l'avantage de moins dégrader la fibre et permet de conserver au maximum ses propriétés mécaniques [49].

1.6.7. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Les fibres végétales sont avantageuses par rapport aux fibres synthétiques, puisqu'elles forment des boucles au lieu de se rompre au cours de leur transformation et de leur fabrication. En outre, la cellulose possède une section transversale ovale aplatie qui augmente le transfert de charge en présentant un rapport d'aspect effectivement plus élevé [56].

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort dans les composites.

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de l'utilisation des fibres végétales comme renfort dans les composites

Avantages	Inconvénients
• Faible coût • Biodégradable (pour l'environnement) • Resource renouvelable • Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité) • Demande peu d'énergie pour la production • Non abrasif pour les outillages • Bon isolant thermique et acoustique • Neutre pour l'émission de CO2 • Pas de résidus après incinération • Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	• Absorption d'eau • Biodégradabilité (pour le matériau) • Fibres anisotropes • Pour des applications industrielles, • Nécessite de gestion d'un stock • Faibles stabilité dimensionnelle • Faible tenue thermique (200 à 300°C • max) • Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions • Météorologiques • Renfort discontinu

1.6.8. Présentation Générale de fibre alfa

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, Le désert commence [58].

1.6.9. Nomenclature et classification Botanique

- Nom vulgaire : L'alfa, en anglais Esparto
- Nom scientifique : Stipa tenacissima L.
- Classification : [59]

Tableau I.5 : Classification Botanique

Règne:	*Plantae*
Sous règne:	*Tracheobionta*
Super Division :	*Spermatophyta*
Division:	*Magnoliophyta*
Classe:	*Liliopsida*
Ordre:	*Poales*
Famille:	*Poaceae*
Genre:	*Stipa L.*
Espèce:	*Stipa tenacissima L.*

1.6.10. Répartition Géographique

Par ailleurs, c'est l'une des espèces xérophiles qui caractérise le mieux les milieux arides Méditerranéens à l'exclusion des secteurs désertiques. Sa terre d'élection est l'Afrique du Nord, et tout particulièrement les hauts plateaux du Maroc et de l'Algérie. Mais cette espèce est présente aussi en Espagne, au Portugal, aux Baléares, et elle s'étend vers l'est jusqu'en Égypte en passant par la Tunisie et la Libye. En France, elle serait présente uniquement dans

Le département du Var. Au sud et à l'est, la limite naturelle de l'Alfa est déterminée par la sécheresse en bordure du Sahara. En revanche, au nord et à l'ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui l'élimine de la flore, elle est beaucoup plus rare dans les étages subhumide et surtout humide. **[60][61]** La répartition territoriale connue à ce jour est estimée à : **[62]**

- Algérie : 4.000.000 ha
- Maroc : 3.186.000 ha
- Tunisie : 600.000 ha
- Lybie : 350.000 ha
- Espagne : 300.000 ha

1.6.11. Etude Botanique

La plante d'Alfa comprend une partie souterraine et une autre aérienne. La partie souterraine, appelée le **Rhizome,** est formée d'un réseau complexe de racines très ramifiées de2 mm de diamètre environ et profondes de 30 à 50 cm, qui se terminent par les jeunes pousses. La partie aérienne est constituée de plusieurs branches portant des gaines emboitées les unes dans les autres, surmontées de limbes longs de 30 à 120 cm. La face inférieure des limbes est légèrement brillante, la face supérieure porte de fortes nervures. L'une et l'autre contre couvertes d'une cire isolante qui permet à la plante de résister à la sécheresse. **[63]**

La tige est creuse et cylindrique, et régulièrement interrompue au niveau du nœud par des enchevêtrements des faisceaux. Au même niveau, se trouvent des bourgeons qui donneront naissance soit à un entre-nœud, soit à une tige, ou reste sous la forme d'une réserve qui entrera en activité lorsque la souche sera épuisée. Les feuilles sont cylindriques, très tenaces, longues de 50 à 60 centimètres. La fleur est protégée par deux glumes de longueur égale. La glumelle supérieure semble partiellement séparée en 2 parties et la glumelle inférieure est plus fine. Généralement, les fleurs apparaissent vers la fin avril début mai et sont de couleur verte. Le fruit est un caryopse (une sorte de grain) qui mesure 5 à 6 mm de longueur. Sa partie supérieure est brune et porte souvent des traces desséchées. **(Figure I.29) [57].**

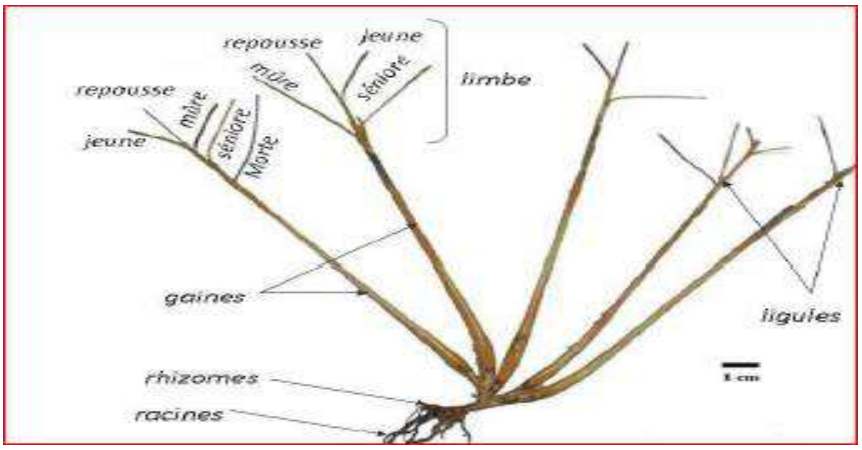


Figure I.29 : Différents composants de la plante d'Alfa **[57].**

1.6.12. La Récolte De l'Alfa

L'Alfa se récolte après la maturation des graines, c'est-à-dire, à partir de juillet-août. La récolte commence par l'enlèvement des feuilles uniquement à la main, par arrachage, suivant la pratique adoptée depuis toujours, soit en enroulant les feuilles autour d'un bâton court, soit en se garnissant la main d'une tige de métal. Le javeleur saisit une poignée d'Alfa, l'enroule autour d'une tige métallique pour assurer sa prise et tire brusquement. Avec son pied il retient les racines pour les empêcher d'être arrachées en même temps que les feuilles. Celles-ci sont liées en petites balles avec une tresse d'Alfa. Puis ces petites balles sont pressées pour constituer les grosses balles qui seront envoyées au centre de collecte. Ensuite, l'Alfa pesée sera stockée dans ces centres avant d'être transférée à l'usine, pour en extraire la pâte à papier en particulier **(Figure I.30).**

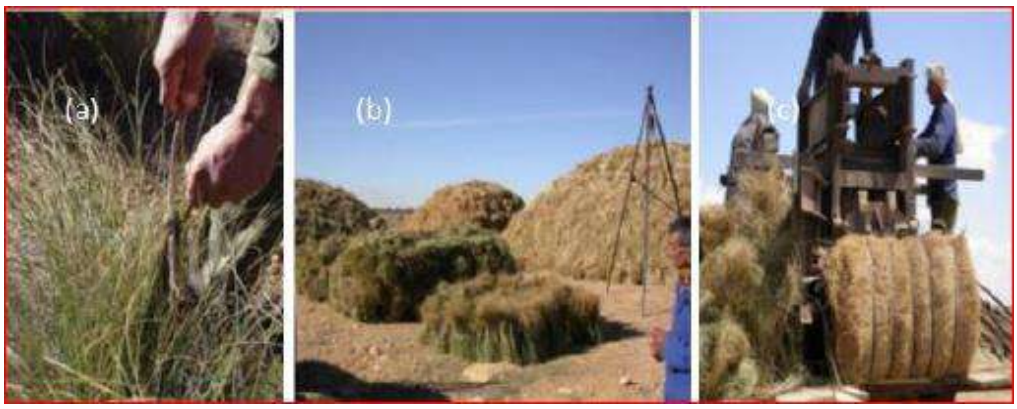


Figure I.30 : Récolte de l'ALFA**.**

Aujourd'hui, il serait possible de mécaniser la récolte d'alfa, cependant, la voie de la mécanisation n'a pas été suivie, car d'un côté, la récolte manuelle fournit un revenu à quelques milliers de cueilleurs, et d'autre part, comme c'est une activité saisonnière, cela ne serait pas économiquement rentable, en plus de la difficulté d'accès et la topographie particulière des nappes alfatières **[57].**

1.6.13. Domaines D'applications

Les applications de l'Alfa sont multiples et diversifiées, et peuvent être classées en deux catégories selon la nature de la matière :

Applications artisanales :

Ces tiges, une fois filées ou tressées, s'emploient pour la fabrication de cordages et d'objets de sparterie (tels que : des tapis, des paniers, des paillassons, des plateaux, des ficelles…). L'utilisation artisanale par les riverains qui habitent dans les régions alfatières peut être évaluée à 50 kg/ménage/an **(Figure 31).**

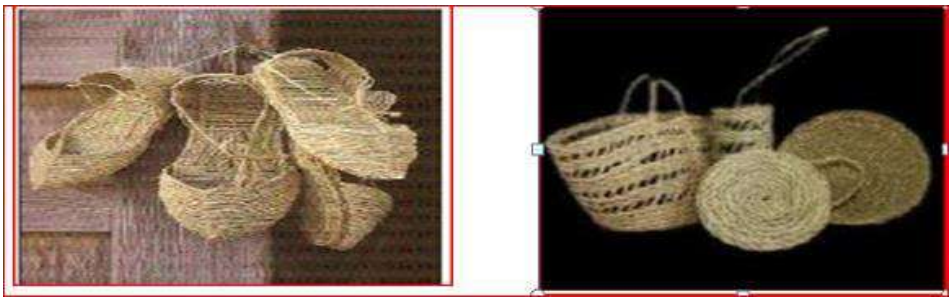


Figure I.31 : Utilisation artisanale des tiges d'Alfa

Applications industrielle

- ***Pâturage :*** Les nappes alfatières constituent un espace pastoral de réserve tant pour le bétail (bœufs, moutons, chameaux…) que pour la faune sauvage (gazelle…). Du fait qu'elle est relativement délaissée par les animaux en présence d'autres ressources pastorales plus appétences, vu sa faible valeur alimentaire, elle constitue un énorme stock qui permet la survie des animaux pendant les années de disette.
- ***Combustible*** : Le pouvoir calorifique supérieur de l'alfa varie de 4666 Kcal/kg pour les brins de 1 an et de 5160 et 5163 Kcal/kg pour les brins âgés de 2 ans et de 3 ans respectivement, ce qui lui confère un usage énergétique important sous forme de briquettes combustibles en remplacement ou d'appoint au bois de feu **[62].**

1.6.14. Intérêt Ecologique Et Enjeu Socio-économique

Cette espèce aux vertus écologiques, économiques et sociales occupe une place très importante dans les pays producteurs et notamment chez les populations qui vivent aux alentours de ces exploitations **[57].**

Intérêt Ecologique

L'Alfa joue un rôle fondamental dans la protection et le maintien de l'intégrité écologique de tout l'écosystème. En effet, elle joue un rôle important dans la lutte contre le phénomène de désertification, elle est considérée comme l'un des remparts face à l'avancée du désert grâce à son système racinaire très développé qui permet la fixation et la protection du sol. Elle permet aussi d'éviter l'érosion éolienne durant les périodes sèches grâce à son aptitude de persister durant les périodes de sécheresse en maintenant une activité physiologique au ralenti. Elle lutte également contre l'érosion pluviale, les touffes d'Alfa constituent des barrages qui freinent le ruissellement.

De plus, cette plante ne nécessite pas une grande quantité d'eau pour survivre, elle est présente dans des aires où les précipitations annuelles se situent entre 50 et 150 mm). Elle utilise ainsi chaque goutte d'eau mise à sa disposition.

Finalement, l'Alfa pousse spontanément sans avoir recours aux pesticides ni insecticides ni engrais, en tout respect et harmonie avec son environnement **[57].**

Enjeu Socio-économique

Cette graminée pérenne présente un intérêt économique certain puisqu'elle entre dans des utilisations à des fins industrielles, cités précédemment, comme la pâte à papier, l'artisanat et les composites biodégradables.

Le chiffre d'affaires annuel de la SNCPA est de 30 millions d'Euros. Actuellement, dans les régions Alfatières marocaines, quelques 41.521 foyers d'éleveurs vivent plus ou moins directement des produits de l'Alfa, et environ 5000 en Tunisie. **[61][62]**

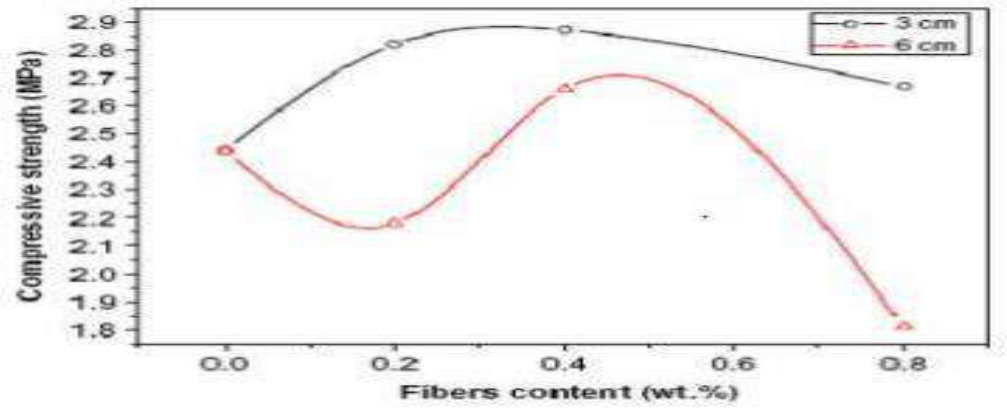
1.7. Influence des fibres végétales sur les propriétés mécaniques des BTC

La stabilisation des BTC, il a été confirmé maintenant que l'emploi des liants minéraux (ciment) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC [63].Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Dans ce qui suit, on va passer en revue l'influence de la présence des fibres en générale et les fibres végétales en particulier, sur les propriétés mécaniques BTC.

1.7.1. Résistance à la compression

Dans un travail de recherche publié en **[64].**se sont intéressés à la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres d'hibiscus cannabiques (Kénaf), pour fabriquer des blocs de terre comprimée sans aucun stabilisant chimique. Les BTC ont été renforcés avec des teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids et avec deux longueurs de fibres 30 mm et 60 mm. Les résultats montrent que la présence des fibres d'hibiscus cannabiques a amélioré les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. L'important effet a été observé avec le cas de 30 mm de longueur de fibre (**figure 32).**

Figure I.32 : Les courbes de la résistance à la compression en fonction de



la teneur et la longueur des fibres

1.7.2. Résistance à la traction par flexion

Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction **[65].**

Les auteurs ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques au non propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. D'après les auteurs, l'impact de ces fibres sur la résistance à la flexion est positif en raison de leur résistance à la traction élevée et de leur adhérence à la matrice d'argile.

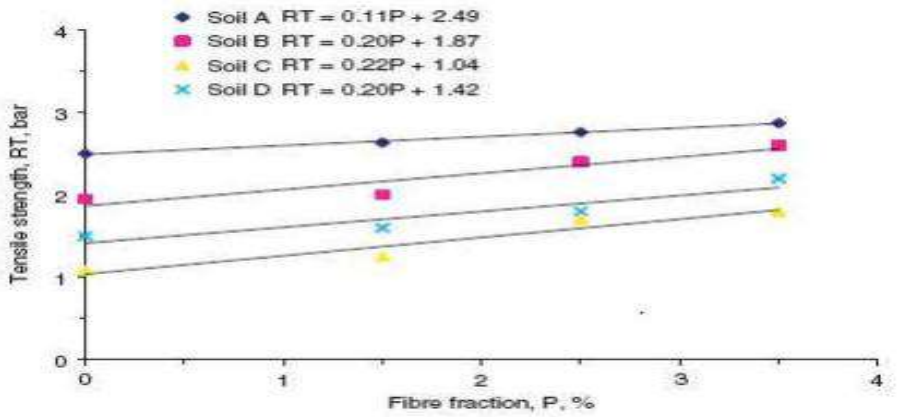


Figure I.33 : Variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en paille d'orge hachée **[66].**

1.7.3. La porosité

Bahloul et al. [67] ont examinée l'analyse des propriétés mécaniques et physiques des mortiers de ciment à base de fibres cellulosiques d'alfa. Ils ont montré que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans les mortiers et que l'ajout de fibres végétales au mortier n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du mortier augmente le volume des vides et diminue la compacité du mortier, d'où une diminution de résistance à la compression. Ils observent aussi que le mortier de fibres donne des valeurs de conductivité thermique λ de l'ordre de 0,8 W/m° C ce qui est assez proche des performances d'un isolant.

1.7.4. L'absorption capillaire

On a vu auparavant que les fibres végétales ont un caractère hydrophile qui favorise l'adsorption d'eau, alors que d'autres types de fibres ont un caractère hydrophobe comme le cas des fibres de polypropylène. Cette faible insensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans son utilisation pour la fabrication des produits en terre crue, chose qui a poussé les chercheurs à essayer d'étudier ce problème et d'évaluer son ampleur. Sallehan et Yaacob [**68]**conclue à travers les résultats des essais d'absorption d'eau réalisés dans l'étude citée dans le paragraphe précédent, qu'il y a une légère augmentation de l'absorption de l'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier. Ravishankar et Raghavan ont confirmé que pour les sols latéritiques stabilisés par la fibre de coco, le taux d'absorption de l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre de coco **[69]**1.13. 3 Effet des fibres sur les propriétés thermiques Vu que l'étude des propriétés thermiques des BTC.

1.8. Influence des fibres d'alfa sur les propriétés thermiques des BTC :

La connaissance des caractéristiques thermiques d' un matériaux de construction est indispensable pour permettre à l'ingénieur de juger de son application .pour cela ,dans les laboratoires, ingénieurs et chercheurs ont recours a diverse méthodes pour évaluer les propriétés thermique d'un matériaux en fonction de leur besoins .L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la longueur des fibres décroit de 16% avec l'ajout de 0,5% de fibre de serment de vignes de longueur de 5mm .l'augmentation de la densité du BTC(diminution de la porosité totale) non fibré sous l'effet du compactage contribue a accroître la conductivité thermiques .

D'autre part, la présence des fibre très peu conductrice de la chaleur, contribue a diminuer la conductivité, ce d'autant qu'elles sont longues et que leur teneur est élevée .le comportement thermiques est donc globalement en phase avec l'évolution de la porosité , comme l'ont relevé certains auteurs l'incorporation de fibre végétales au BTC est une stratégie utilisée depuis des lustres pour la fabrication de matériaux de construction dans les régions chaudes ,le chois de la nature des fibre , leur teneur et longueur ainsi que la naturel. **[70]**

1.9. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique concernant la construction en terre ainsi que les BTC renforcées de fibres naturelles de nature végétale. Cette présentation servira à définir les différents types des fibres végétales, leurs structures et leur composition chimique. Aussi, les caractéristiques physico-chimiques des différents types de fibres végétales et spécialement les fibres d'Alfa qui ont une influence importante sur leurs propriétés macroscopiques. Il est très important de prendre en compte ces propriétés avant de les utiliser dans le renforcement des matériaux composites biodégradable.

Chapitre II

Matériaux utilisées et Méthodes Expérimentales

2.1 . Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter et caractériser les différentes matières premières utilisées lors de cette étude et d'entrer dans les compositions des composés étudiés. Connaître les propriétés physiques et chimiques du sol, la qualité du sable, des fibres utilisées et du ciment utilisé en travaillant avec d'éventuelles expériences**.**

2.2 . Matériaux Utilisé

2.2.1. Le Sable

Dans notre étude nous avons utilisé le sable de boughazoul – Médéa, avec les normes expérimentales internationales, et parmi ceux-ci figurent les critères suivants :

1. Equivalent sable

Il est défini par la norme NFP 18-598; cet essai permet de mesurer la propreté du sable, il est effectué sur la fraction d´un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floculent [71].

2. Analyser la nature du sable

Le problème consiste donc à analyser la nature du sable, c'est-à-dire de trouver un moyen d'observer et de mesurer la proportion considérés argileux dans le sable. Cette analyse permet de vérifier si l'argile se trouve dans les proportions qui permettent de réaliser mélange de qualité**.**

Comment faire pour observer l'argile présente dans le sable ? Un moyen consiste à séparer l'argile du sable de façon précise, c'est-à-dire en limitant les fortement et les pertes de manipulation.

Pour cela il est à observer qu'en présence d'une solution de glycérine, formaldéhyde et de chlorure de calcium, l'argile flocule. C'est-à-dire que l'argile se rassemble sous forme de petits flocons. Après agitation dans cette solution, ces flocons descendant par gravité de façon très lente. Cela signifie qu'après agitation le sable brut descend très rapidement alors que l'argile se dépose beaucoup plus lentement en une vingtaine de minutes. Ainsi le sable brut peut-être visiblement séparé de l'argile qui se déposera lentement au- dessus. Là hauteur totale représente la hauteur de l'échantillon. Le rapport entre la hauteur de sable brut et la hauteur totale donne représente la proportion de sable brut dans le sable. Cette proportion exprimée en pourcentage est appelé **ES** « Equivalent de Sable ».

2. L'essai Equivalent de Sable

Doit être réalisé selon la norme NFP 18-598



Figure II.1 : Essai

Equivalent de sable de boughazoul = 74%

Tableau II.1 : Classification des sables selon leur équivalent de sable

ES a vue	ES au piston	Nature et qualité de sable
ES< 65%	ES<60%	Sable argileux
65%≤ES<75%	60%≤ES<70%	sable légèrement argileux
75%≤ES<85%	70%≤ES<80%	sable propre à faible proportion de fines argileuses
ES≥85%	ES≥80%	Sable très propre

Donc sable de Boughazoul est sable propre à faible proportion de fines argileuses.

4. Masses volumiques du sable

1. *La Masse Volumique Apparente* : Cet essai est régi par la norme NF P 18-554 [72].

2. *Masse volumique absolue :* L'essai de La Masse Volumique absolue doit être réalisé selon la norme [73].

Les masses volumiques s'expriment en t/m3, en kg/m3, ou en g/cm3.

5. Analyse granulométrique du sable

Cet essai est régi par la norme NF P 18-560[74]. Ce dernier consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis (voir la photo II.A1 dans l'annexe), emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis [74].

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par les résultats de l'essai de l'analyse granulométrique. L'analyse granulométrique en effet consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains, en utilisant généralement les tamis 0.08, 0.160, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5mm.

Le tableau suivant présente les caractéristiques physiques du sable utilisé.

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques du sable utilisé

Caractéristique			Normes
Type	Roulé		Norme NFP 18-598 [71]
Classe granulaire	0/3		
Masse volumique absolue	2470 kg/m3		NORMES : EN 1097-3[72]
Masse volumique apparente	1430 kg/m3		NORMES : NF P18-554 [73]
Equivalent de sable (%)	à vue	78.72	Norme NFP 18-598 [71]
	à piston	74.04	

2.2.2. Le ciment

1. Caractéristiques du ciment utilisé :

Le ciment utilisé dans notre composite est de type **CPJ / CEM II A 42.5 (Mâtine)** conforme à la norme NEF 15-301**[75]** est un ciment Portland artificiel dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 Mpa, produit par la cimenterie de LAFARGE.

a. Prise du ciment norme EN 196-3[76]

Il est nécessaire de connaître les début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques: Le début de prise et la fin de prise.

b. Consistance normale

Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 196-3[76], l'appareil utilisé est le même que pour l'essai de prise sauf que l'aiguille est remplacée par une sonde, au bout duquel la distance entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule est de 6 ± 1mm.

c. Finesse de mouture : norme NF EN 196-6 [77]

La caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en pourcentage (%), plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ses résistances mécaniques à jeune âge sont grandes. En outre, la finesse de mouture influe sur la plasticité et la cohésion de la pâte de ciment à l'état frais, ainsi que son pouvoir de rétention d'eau et la ressuée

d. Caractéristiques Chimiques

Tableau II-3 : Caractéristiques chimiques du CPJ CEM II/A 42.

Caractéristiques Chimiques	
Norme NA 442	Ciment ECD
Sulfates SO3 ≤ 3.5 %	SO3 ≤ 2.00 %
Chlorures Cl- ≤ 0.1 %	Cl- ≤ 0.08 %

e. Les caractéristiques physiques :

Tableau II.4: Caractéristiques physiques du CPJ CEM II/A 42.5.

caractéristiques physiques :	
Norme NA 442	Ciment ECD
Début de prise ≥ 60 mn	Début de prise> 60 mn
Stabilité à chaud ≤ 10mm Retrait 28j ≤ 1000 µm/m	Stabilité à chaud < 7mm Retrait 28j < 650 µm/m

2.2.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée dans l'expérience de l'eau du robinet pour l'état de Médéa, sur laquelle plusieurs expériences ont été menées par les laboratoires spécialisés sur le suivi technique et la confirmation de l'aptitude à son utilisation dans divers travaux.

2.2.4. La fibre d'alfa

Parmi les études dans le domaine de l'ingénierie des matériaux de construction et autres, nous parlons de ce qu'on appelle composition de ciment à l'aide de fibres végétales, parmi lesquelles se trouve la plante alfa, que nous trouvons souvent abondante dans le désert et l'Algérie au sud, où nous avons fait une étude sur la plante alfa de Bouaiche à Médéa, ainsi que le contrôle, en termes de propriétés physiques, chimiques, mécaniques et biologiques **(Figure II.2).**



Figure II.2 : Fibres de Alfa

1. Extraction des fibres d'alfa :

L'extraction des fibres d'alfa a été réalisée en utilisant deux types de traitement, chimique et mécanique. Le traitement chimique a été réalisé en se basant sur les tra-

vaux de la littérature sur l'extraction de l'alfa. Nous avons choisi l'extraction par action alcaline à l'aide de la soude. Cette méthode a été élaborée pour avoir une extraction moins agressive, elle consiste à dégrader les constituants non cellulosiques de la plante en prenant en compte l'adéquation, la rapidité et la conservation des propriétés des fibres, et en respectant les exigences environnementales bien entendu.

Cette extraction a été réalisée en trempant les feuilles d'alfa dans des béchers avec les solutions alcalines (**figure II. 3**). Après le temps déterminé pour le trempage, les fibres ont été retirées des béchers puis rincées plusieurs fois avec de l'eau distillée pour éliminer toute trace de la solution NaOH. Les fibres extraites ont été ensuite mises dans l'étuve à une température de 60°C pendant 2 heures pour un séchage en douceur sans les dégrader.



Figure. II.3 : Traitement des fibres d'Alfa

2. Protocole Chimique d'Alfa

1. Couper les fibres d'alfa en petits morceaux de (4cm) ;
2. Le lavage par l'eau permet d'éliminer les poussières ;
3. On a préparé la solution de NAOH 50g / L ;
4. Mettre une masse de fibre d'Alfa dans un bicher d'un litre et ajouter la solution de NAOH qui et laisser reposer pendant 24heure ;
5. Laver les fibres d'ALFA ;
6. Préparer une solution de l'acide Acétique H_2SO_4 (10g de H_2SO_4 /500g de l'eau distillé)

7. Mettre alfa dans un bicher et ajouter l'acide acétique. Laisse reposer pendant 2min et laver la fibre par l'eau et mettre dans l'étuve à 105 C° pendant 6heures.

3. Masses volumiques des fibres

Elle représente la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides et porosité inter-granulaires. Les essais consistent à remplir un récipient vide de volume connu par le matériau sec sans le tasser et à peser ensuite cette quantité de matériau.

4. Absorption des fibres d'Alfa

Le tableau suivant présente le taux d'absorption des fibres d'alfa :

Tableau II.5: La valeur de taux absorption de fibre d'alfa

	1min	2min	3min	5min	15min	30min	1h	2h	24h
Masse humide(g)	9	10	11	12	13	14	15	16	18
Masse sèche(g)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Taux absorption $\gamma(\%)$	80	100	120	140	160	180	200	220	240

2.2.5. Le sol

Le sol utilisé est de la région de Draa Essemar - Médéa - Algérie. Il s'agit de sol sableux limoneux caractérisés par les particules d'argile les plus fines avec une forte cohésion qui rend la séparation difficile lorsque le sable est rugueux et certaines matières organiques.

Le type de sol utilisé dans l'expérience est déterminé en connaissant :

- Ses propriétés physiques et chimiques en termes de forme ;
- Ses propriétés biologiques en termes de composants organiques ;
- L'effet de l'eau sur eux en termes de facilité d'érosion, ce dernier, selon les normes,

Les caractéristiques qui classent les sols sont en générale les suivants :

1. La teneur d'eau

La teneur en eau d'un sol, d'un granulat ou d'un matériau de façon plus générale est une action des plus courantes en géotechnique et également des plus fondamentales. Cette valeur permet en effet d'exprimer beaucoup d'autres va-

leurs en les ramenant à une expression de masse sèche. La teneur en eau d'un matériau est variable dans le temps et dépend de nombreux facteurs. Selon la norme NF P94-050**[79]**

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{w}(\%) = \frac{\boldsymbol{m_1 - m_2}}{\boldsymbol{m_1}} \times \mathbf{100}$$

m_1 : est la masse de la prise d'essai et de son contenant avant le passage à l'étuve ;

m_2 : est la masse de la prise d'essai et de son contenant après le passage à l'étuve.

- ✓ La valeur de La teneur en eau de sol utiliser : on a coefficient corrélation **R=0.96** **et** $\boldsymbol{w}(\%)$**=36.79**

2. La masse volumique

La masse volumique d'un sol p est le quotient de la masse (m) du sol par le volume (V) qu'il occupe (y compris les fluides qu'il contient).selon la norme NF P94-053[80]

- ✓ la masse volumique apparente : **ρ = m/V**

La valeur de masse volumique apparente du sol utilisé : **ρ = 1124,33 g/cm3**

- ✓ la masse volumique absolue : $\boldsymbol{\rho = M_2/(M_2 + M_1 - M_3)}$

La valeur de masse volumique absolue du sol utilisé : **ρ=2,146 g/cm3**

- ✓ La relation suivante permet d'accédera la valeur de la densité :

$$\boldsymbol{d} = \frac{\boldsymbol{M_2}}{\boldsymbol{M_1 + M_2 - M_3}} \times \boldsymbol{\rho_{eau}}$$

3.Les Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) : Teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol : **NF P94-051 [81]**

- ➢ ***Limite de liquidité« W_l »***: Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique**.**

- ***Limite de plasticité « W_P »***: Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.
- ***Indice de plasticité « Ip »:*** Différence entre les limites de liquidité et de plasticité) $1_p = W_L - W_p$.

Cet indice définit l'étendue du domaine plastique (voir **figure II.4** suivant le **tableau II.6.**

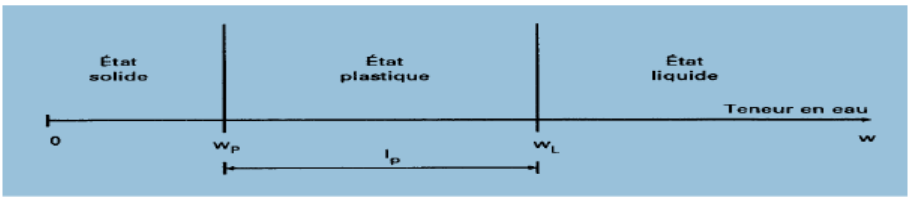


Fig. II.4 : Différents état du sol

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol, en relation avec l'existence de couches d'eau adsorbée avec ou sans électrolytes dissociés. On conçoit donc que les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés.

Tableau II.6: Degrés de plasticité des sols

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Limite de liquidité par l'essai au pénétromètre :

La limite de liquidité est déterminée par l'essai au pénétromètre : norme NF P94-052-1 Novembre 1995. La valeur de limite de liquidité de sol utilisé est :

Wl =37%



Fig. II.5 : Essai au pénétromètre

Limite de plasticité « Wp »:

La limite de plasticité est déterminée Selon la norme NF P94-051 Mars 1993[81].

La valeur de Limite de plasticité de sol utilisé est :

$$W_p = 19\ \%$$



Fig. II.6 : Détermination de la limite de plasticité

Indice de plasticité « Ip »:

Différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique (voir **figure II.6**) est donné suivant la relation suivante :

$$1_p = W_L - W_p$$

Pour notre sol : IP = 18 %

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol, en relation avec l'existence de couches d'eau adsorbée avec ou sans électrolytes dissociés. On conçoit donc que les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés.

Le tableau suivant présente les différents degrés de plasticité :

Tableau II.6: Degrés de plasticité des sols

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

Donc notre sol est plastique (15<Ip<40)

Indice de consistance :

L'indice de consistance permet d'évaluer l'état hydrique des sols fins, il est présenté suivant la relation suivante :

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_p}$$

W : teneur normale de notre sol **W=18.18%**

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_p} = \frac{37 - 18.18}{18} = 1.05\%$$

Les résultats des limites d'Atterberg sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.7 : Limites d'Atterberg du sol utilisé

Limite de liquidité	37%
Limite de plasticité	18%
Indice de plasticité	19%

4.Analyse granulométrique

a. Analyse granulométrique par tamisage (norme. NF P94-056)[82]

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

b. Analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057)[83]

La présente norme s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80 µm d'ouverture. Les particules de taille inférieure à 1 Um ne peuvent cependant pas être différenciées par cet essai. L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification

2.3. Formulations des BTC

2.3.1 Compactage :

Le compactage est l'ensemble des procédés mécaniques (charge, vibration, chocs), qui mènent à la diminution du volume et l'amélioration de la densité d'un sol. La texture du sol est ainsi resserrée ce qui élève la compacité du sol, améliore sa capacité portante. La masse volumique sèche apparente optimale d'un sol dépend de sa nature, de la teneur en eau et de l'énergie de compactage **(Figure II.7).**



Fig. II.7 : Compactage des éprouvettes

2.3.2 Composition des BTC

Les fibres d'alfa sont incorporées dans les BTC par substitution volumiques du sol avec des pourcentages de (0.5 à 3%).

Tableau II.8 : Composition des BTC à base de fibres d'alfa (H : pourcentage de fibre alfa)

BTC	Sol (Kg/m3)	sable (Kg/m3)	Ciment (Kg/m3)	Eau (l/m3)	Fibres d'alfa	
					(Kg/m3)	(%)
BTCT	*915*	*450*	*135*	*270*	*0*	*0*
BTC0.5H	*907.5*	*450*	*135*	*270*	*7.5*	*0.5*
BTC1H	*900*	*450*	*135*	*270*	*15*	*1*
BTC1.5H	*892.5*	*450*	*135*	*270*	*22.5*	*1.5*
BTC2H	*885*	*450*	*135*	*270*	*30*	*2*
BTC2.5H	*877.5*	*450*	*135*	*270*	*37.5*	*2.5*
BTC3H	*870*	*450*	*135*	*270*	*45*	*3*

2.3.3 Malaxage et compactage :

Le malaxage des BTC se fait en malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L pour la confection des éprouvettes (4x4x1) cm^3. Le malaxage de chaque mélange se fait de la manière suivante :

- On verse le sol passé au tamis de 5mm au préalable ;
- On ajoute par la suite le ciment ;
- Puis en ajoute le sable après on malaxe pendant 30 sec vitesse lente ;
- On ajoute ensuite l'eau, et sans plus tarder les fibres ;
- on malaxe 30 sec encore en vitesse rapide ;
- On remplit les moules avec le mélange molle en 3 couches et chaque fois on essaye de bien rétablir les moules avec un poids.
- Ensuite on pose les moules sur la table vibrante et on laisse tomber en-dessus une charge d'environs de 20 Kg et on vibre pendant un minute.



Fig. II.08 : Malaxage et compactage des éprouvettes

2.3.4Conservation des éprouvettes

Avec le mélange préparé nous avons remplis trois moules de dimensions (4×4×16) cm3. Entre 20 et 24 heures après le début du malaxage, ces éprouvettes sont laissées séchées jusqu'au jour de l'essai.

2.4. Protocol expérimentale

2.4.1. Essai de compression :

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme NFP 18-406) [84], par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, à 28, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN **(Figure II.09)**.Pendant l'essai la vitesse de chargement est constante, la résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes.



Fig. II.09 : Presse hydraulique

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la **(Figure II.10)**.

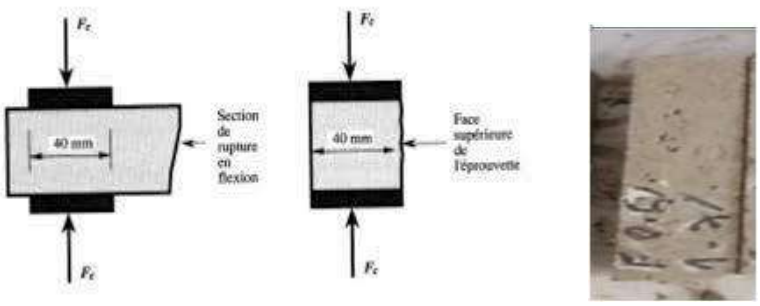


Fig. II.10 : Demi-prismes de l'éprouvette

2.4.2. Essai traction par flexion

L'essai a été effectué selon la norme NF P 18 – 407 [85] et à la norme EN 196-1[86]. Les éprouvettes sont testées après une cure de 28 jours dans l'eau. L'éprouvette repose sur deux appuis simples distants de l =100 mm et la charge F est appliquée au

centre de l'échantillon, symétriquement par rapport aux appuis. Les composites de section (b x h) étant supposés homogènes, la contrainte normale de traction est appliquée sur la section de la poutre prismatique **(Figure II.11)**.

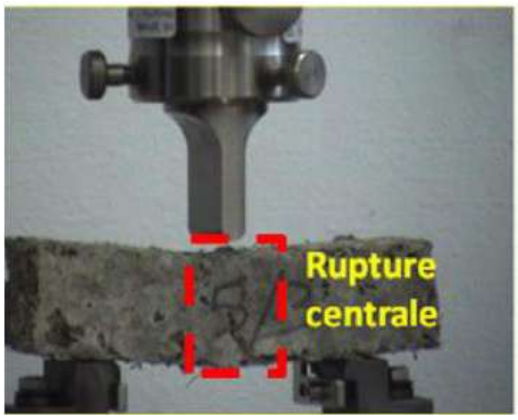


Fig.II.14 : Essai de traction par flexion

2.4.3. Conductivité thermique

La conductivité thermique et la chaleur volumique des matériaux sont déterminées sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm^3 en utilisant la méthode du film chaud. La mesure est réalisée sur des éprouvettes de masse stabilisée et initialement en équilibre thermique avec échantillons de mortier a été en fonction de la procédure similaire à celle décrite dans ASTM D5930-97[87]. La conductivité thermique à diverses humidités du mortier, après 28 jours de durcissement, a également été déterminée. La conductivité thermique est mesurée après la saturation totale et après différents temps de séchage dans l'étuve à 60°C, afin d'examiner l'effet de la teneur en eau sur la conductivité thermique des échantillons **(Figure II.12).**

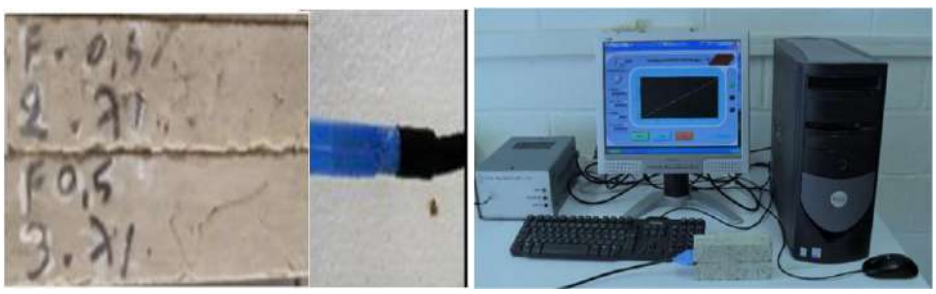


Fig. II.12 : Essai thermique

2.

La porosité totale (n) d'un matériau poreux est définie comme le rapport du volume des vides (Somme du volume d'eau et du volume d'air) sur le volume total de l'échantillon. Elle est exprimée en pourcentage.

L'échantillon préalablement sèche à 40°C est place dans un dessiccateur étanche sur une grille en céramique perforée afin d'optimiser la surface de contact. Une fois le dessiccateur ferme, le vide est fait à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à ce que l'on atteigne une pression constante de 50 mbar. **(Figure II.13).**

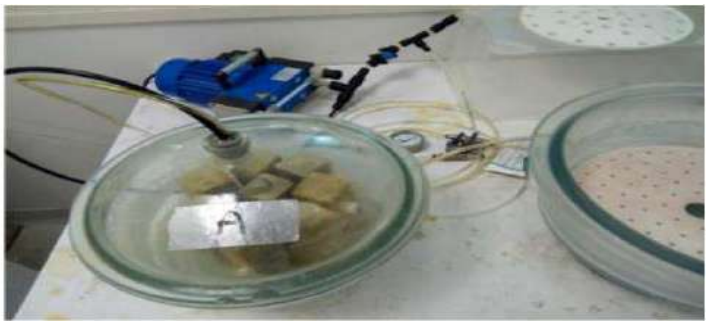


Fig. II.13 : Mesure de la porosité

Ensuite, le vide est maintenu pendant au moins 4h. L'étape suivante est l'immersion dans l'eau déminéralisée à mi-hauteur des éprouvettes durant 48h et la dernière étape est l'immersion complète des éprouvettes dans l'eau déminéralisée durant 24h supplémentaires. A l'issue de la saturation, les éprouvettes saturées sont pesées, tout en restant immergées dans l'eau pour obtenir la masse en immersion M_{hyd}. Elles sont ensuite essuyées avec un chiffon humide puis pesées dans l'air pour obtenir la masse saturée dans l'air (M_{sat}).

On peut déduire de la valeur de la porosité totale, la teneur en eau maximale (w_{max}) qui correspond à la quantité d'eau maximale que l'échantillon peut retenir dans ses pores intra granulaires. Cette teneur en eau maximale est calculée comme suit :

2.4.5. Imbibition par capillarité

Les propriétés d'imbibition par capillarite d'un matériau poreux sont directement liées à la taille et à la forme des pores, ainsi qu'à la connectivité des réseaux poreux. Les essais d'imbibition d'eau par capillarite renseignent sur les cinétiques de succion en régime diphasique eau/air.

Les essais sont effectués sur des éprouvettes (4 x 4 x 16) cm3, les surfaces latérales des échantillons sont rendues imperméables et leur base est immergée sur 5 mm. Le bac d'essai est ensuite couvert afin de limiter l'évaporation et conserver une humidité relative de 100% autour des échantillons **(Figure II. 14)**. La seule précaution à pren-

dre consiste, avant chaque pesée et à l'aide d'un chiffon légèrement humide, à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inferieure de l'échantillon. Le suivi de masse des éprouvettes est réalisé à [1min ; 2min ; 3min ; 10min ; 15 min ; 30 min ; 1h ; 2h ; 4h ; 8h ; 12h ; 24h et 48h].



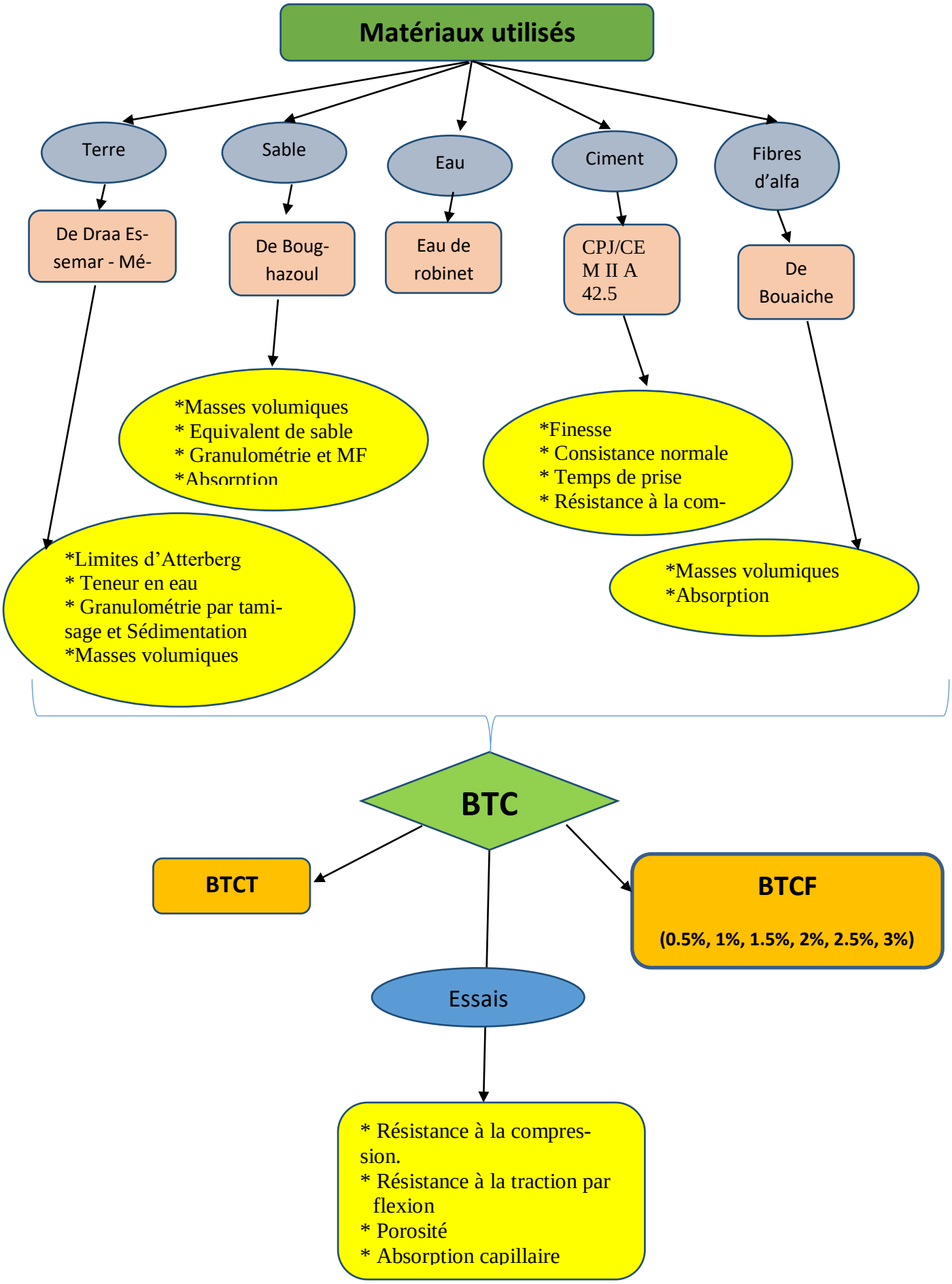
Fig. II.14 : Imbibition par capillarité

2.4.6. Variation dimensionnelle

Certains matériaux industriels doivent être stables dimensionnellement et ce quelle que soit la température d'utilisation. Les variations dimensionnelles dues aux changements de température sont facilement appréhendables (par la connaissance des coefficients de dilatation thermique), il n'en est pas de même des variations dimensionnelles qui s'opèrent à température constante. Les évolutions dimensionnelles survenant à température constante sont dues à deux causes principales :

- la première est liée aux sollicitations appliquées aux matériaux (contrainte mécanique, agressivité du milieu environnant, etc.) ;
- la seconde est liée aux matériaux eux-mêmes du fait des évolutions de leur microstructure qui se produisent sous l'effet des maintiens prolongés à une température donnée. Ces évolutions microstructurales peuvent entraîner des variations de la masse volumique du matériau et ainsi conduire à des variations dimensionnelles significatives. Ce second aspect peut être illustré par différents cas rencontrés dans les industries aéronautique et nucléaire.

2.5. Variables étudiées



2.6. Conclusion

La valorisation des fibres d'alfa dans la masse des BTC constituent une alternative économique et écologique importante dans certains pays qui encouragent la construction en terre. Cette étude présente une contribution à l'étude de l'effet des déchets d'alfa sur les propriétés mécaniques et thermiques des BTC, en traitant les points suivants :

- Caractérisation des matériaux utilisés dans la confection des BTC ;
- La méthode de fabrication ;
- La procédure expérimentale et les essais réalisés sur BTC renforcés de fibres d'alfa.

Chapitre III
Résultats et interprétation

3.1. Introduction

Dans ce dernier chapitre, on présente les résultats obtenus pour les différents essais réalisés sur les BTC renforcées avec les fibres d'alfa. Les résultats de chaque essai et la moyenne arithmétique des trois résultats d'essais.

3.2. Influence des fibres d'alfa sur les propriétés mécaniques des BTC :

3.2.1. Résistance à la compression :

Les résultats présentés sur la Figure III.1, nous permet de comparer les valeurs des résistances à la compression des différentes compositions des BTC réalisées.

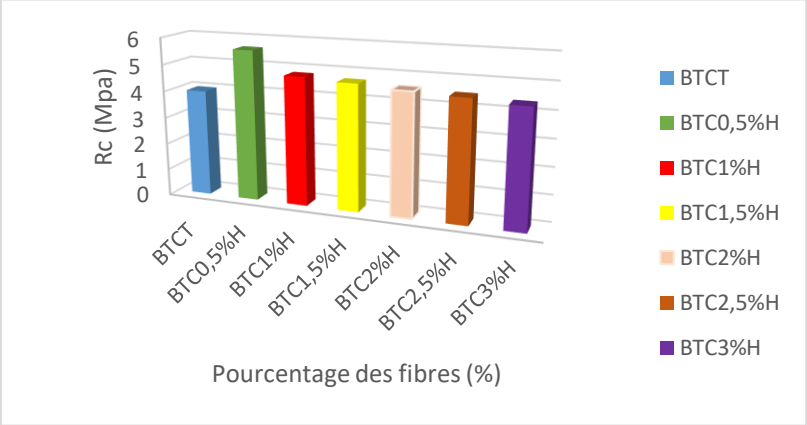


Fig.III.1: Résistance à la compression des BTC à base de fibres d'alfa

D'après ces résultats obtenus, on remarque que la résistance sèche à la compression des BTC varie et diminue entre 4 Mpa et 5 Mpa qui est acceptable. La résistance diminue en général avec l'augmentation du pourcentage des fibres d'alfa. A l'exception du pourcentage de 0.5 %, où la résistance à la compression a atteint la plus grande valeur de 5.15 Mpa. Ceci est dû à la nature des fibres d'alfa qui ne sont pas dures et qui sont maniables, et suite au compactage des BTC, la matrice et les fibres sont bien homogénéiser entre elles.

Ceci est en accord avec le travail de recherche publié en **[64]**. L'important effet a été observé dans **[la figure I. 32].** Et on remarque que la résistance à la compression est diminue avec l'augmentation du pourcentage des fibres.

3.3.2. Résistance à la traction par flexion

La Résistance à la traction par flexion trois points, des BTC en fonction des différents pourcentages de fibre d'alfa sont illustrées sur la **(Figure III.2).**

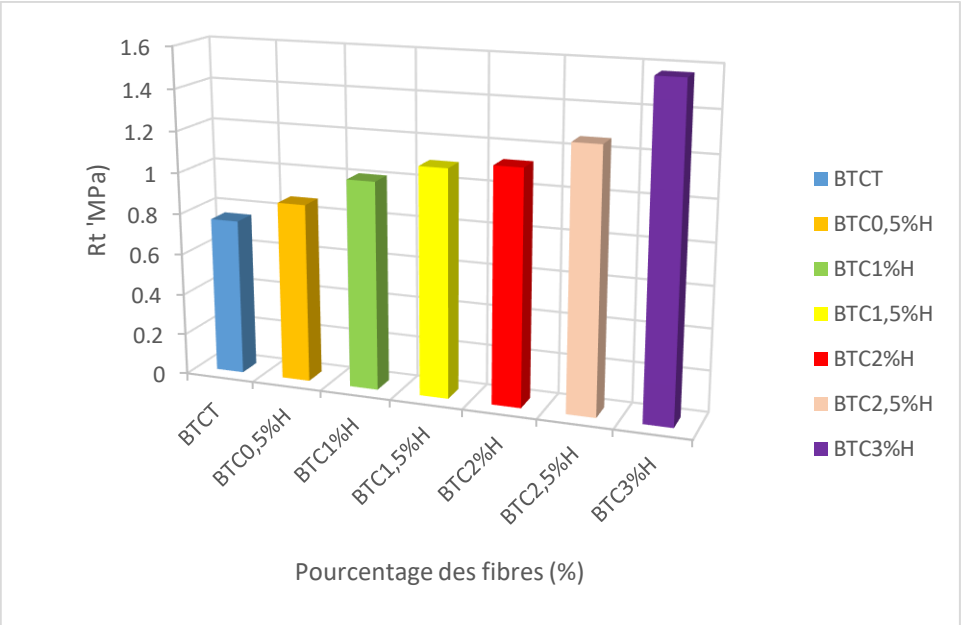


Fig.III.2 : Résistance à la traction des BTC à base de fibres d'alfa

D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance à la traction des BTC varie entre entre1Mpa et 1.65Mpa. Elle augmente aussi avec l'augmentation du pourcentage des fibres qui est aussi acceptable pour ce type de matériau. Ceci est dû à la bonne adhésion entre les fibres d'alfa et la matrice des BTC constitué principalement par la terre et le sable. Cette adhésion qui est probablement due à la nature et la morphologie des fibres d'alfa, et qui nécessite une vue microscopique de la structure intérieure des fibres.

Ceci est en accord avec le travail Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction **[65].**

3.3. Influence des fibres d'alfa sur les propriétés thermiques des BTC :

Les résultats de la Conductivité thermique des BTC en fonction des différents pourcentages des fibres d'alfa sont présentées sur la **(Figure III.3).**

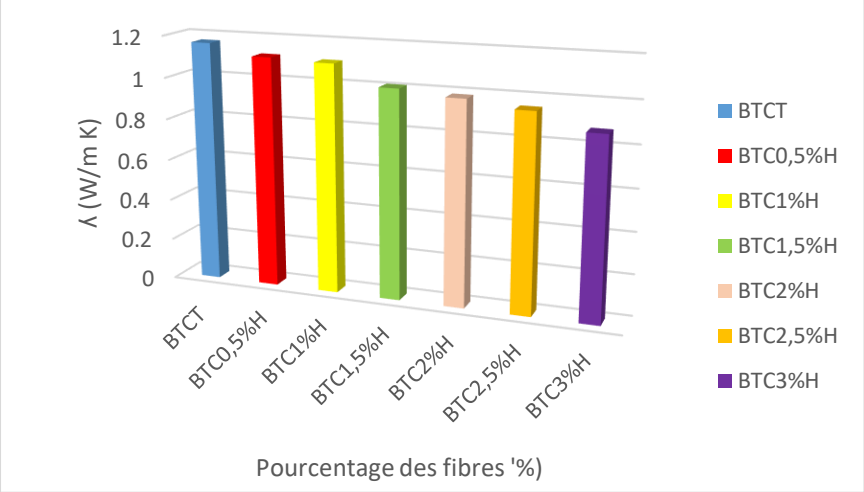


Fig.III.3 : Conductivité thermique des BTC en fonction des fibres d'alfa

D'après la **(Figure III.3),** on constate que la conductivité thermique des BTC varie entre 0.851 W/m.K et 1.165W/m.K. Elle diminue en effet avec l'augmentation du pourcentage des fibres. C'est-à-dire plus on a de fibres plus le pouvoir isolant des BTC s'améliore. Ce qui classe notre produit dans la classe des matériaux isolants.

Ceci était constate dans plusieurs études, tels que **[70]**la présence des fibre très peu conductrice de la chaleur, contribue a diminuer la conductivité, ce d'autant qu'elles sont longues et que leur teneur est élevée .le comportement thermiques est donc globalement en phase avec l'évolution de la porosité , comme l'ont relevé certains auteurs l'incorporation de fibre végétales au BTC est une stratégie utilisée depuis des lustres pour la fabrication de matériaux de construction dans les régions chaudes ,le chois de la nature des fibre , leur teneur et longueur ainsi que la naturel.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était la préparation et la caractérisation de nouveaux matériaux composé de principalement de la terre et de ciment renforcées de fibres végétales « Alfa » et d'étudier leur influence sur les caractéristique mécaniques et thermiques des briques de terre comprimées BTC. Après l'analyse des résultats nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

- Les fibres d'alfa influent négativement sur la résistance à la compression des BTC; mais les valeurs obtenus sont acceptables pour ce genres de briques destinés à la séparation dans le bâtiment ;
- La densité des BTC est diminuée en fonction d'augmentation de pourcentage d'incorporation des fibres d'alfa.
- La résistance à la traction par flexion augmente en fonction d'incorporation des fibres d'alfa dans les BTC.
- La conductivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage d'incorporation des fibres d'alfa, ce que l'a veut dire que le pouvoir isolant des briques s'améliore ce qui est une qualité souhaité actuellement pour ce genre d'éco-matériau.

Vu les résultats obtenus de cette étude, on peut avancer que l'utilisation des fibres d'alfa dans la fabrication des BTC peut constituer une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. On recommande finalement l'utilisation de ces types de matériaux dans les éléments de séparation.

Recommandations et Perspectives

Nous recommandons ce qui suit :

- Etude de la durabilité des BTC à base de différent type de fibres d'alfa ;
- Valorisation d'autres types de fibres végétales comme un renfort pour les BTC ;
- Etude gel et de dégel des BTC à base de différents types de fibres d'alfa
- Remplacer le ciment par d'autre liant pour les BTC à base de fibres d'alfa et comparer les résultats.

Références Bibliographiques

[1] **Ministère** de l'Emploi de la Cohésion Sociale et Du Logement. Réglementation thermique 2005: l'essentiel [Internet]. 2006. Avalables from: http://www.rtbatiment.

FR/fileadmin/documents/RT2005/PDF/Essentiel_RT2005.pdf

[2] Imerys. L'encyclopédie de la brique. 2009

[3] ANGER, R. & FONTAINE, L. (2009). Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie

[4] http://www.aps.dz/regions/89383-retour-a-la-construction-en-terre-pour-preserver-l-identite-architecturale-algerienne13 mai 2019 ... SKIKDA - Le retour aux architectures et construction en terre est ... pays contribuera à la préservation de "l'identité architecturale de l'Algérie

[5] CNERTP. (Février 1993). Système de stockage décentralisé, Recherche sur les greniers en terre. s.l. Projet BEN 87/017, Février 1993. p. 40.

MEKHERMECHE, A. (2012). Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des K sours sahariennes. Université KASDI MERBAH OUARGLA. Algérie : Faculté des sciences et de la matière, 2012. p. 131.

[6] **Achenza** : Etude de la stabilisation de la terre avec des polymères naturels pour la construction des blocs de maçonnerie. (2006). Science directe. Bui et al, Durabilité des murs en terre battue exposés pendant 20 ans à l'altération naturelle. (2009). Sciences direct SAADI, I. (2011). Comportement mécanique des briques de terre crue renforcées par des fibres de palmier et des fibres de paille. Université Badji Mokhtar. Annaba, Algérie : Laboratoire de Génie Civil, 2011.

[7] Guerraoui, F., Zamama, M., &Ibnoussina, M. Caractérisation minéralogique et

géotechnique des argiles utilisées dans la céramique de Safi (Maroc). Africain Journal of Science and Technologie, Science and Engineering, 9(1), 1-11, 2008

[8] NOZAHIC V., AMZIANE S. « Influence of sunflower aggregates surface treatments

on physical properties and adhesion with a mineral binder », Compo. Part A:Applied

Science and Manu. vol. 43, n° 11, p. 1837-1849, 2012.

[9] THUAULT A., EVE S., BLOND D., BREARD J., ET AL. « Effects of the hydrothermal environment on the mechanical properties of flax fibres », Journal of Compo

[10] Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniuam AS. Soft Ground Improvement in lowland and other Environments. ASCE Press. New York, 1996

[11] Winterkorn HF**.** Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, 1975

[12] Houent H, Guillaud H. Arth construction a compréhensive guide. London

[13] Veniat, Le traitement des sols a la chaux et au ciment, CERILH, 1980.

Inter médiate Technologie; 1994

[14] Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement stabilised soil.

Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633-641, 2004

[15] Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R. Durability of lime stabilized earth Blocks. Courrier du Savoir, N°02, pp. 61-66, 2002

[16] P'KLA A. Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): Application aux maçonneries « BTC-Mortier de terre. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2002

[17] Mesbah A, Morel JC, Olivier M, Comportement des sols fin argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents, Matériaux et constructions, vol 32, N°223, 1999

[18] Olivier M. et Mesbah A. Le matériau terre : essai de compactage statique pour la

Fabrication de briques de terre compressées. Bull. liaison Labo. P. et Ch., volume146. : pp37-43, 1986.

[19] Centre for Développements of Enterprise C.D.E). Compressed earth blocks: Testing Procédures. In: C.D.E., ENTPE et CRA Terre Code, Brussels, Belgium, 2000

[20] Izemmouren O, Guettala A. Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. Matec web of conférence, vol 11 02001,2014

[21] M. Véniat, Le traitement des sols à la chaux et au ciment, CERILH, 1980.

[22] Nenonene, A. Y.,''Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage'', thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009

[22] Laurans F. A.Déjardin, J.Pilate, ''Physiologie de la formation des parois de fibres de bois'', composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.27-39,2006

[23] Anil, N. ''composite get greener '', Material today, Vol 45, pp12, 2001

[24] Bodros, E., C. BALEY,'' Etude des propriétés de biopolymer renforcés par des fibres de lin aléatoirement dispersées dans le plan de stratification'', propriété aux interfaces et composites, Université de Bretagne-Sud, 2006

[25]] Gouanvé, F., S.Marais, M. Métayer,' composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin'', composites et matériaux avancées, Vol.16, pp.117.128 ,2006

[26] Nardin, M.,''interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres vegetales'', revue des composites et des matériaux avances, Vol 16, pp 49-61, 2006.

[27] K. Chalets, C. Morvan, J. Bréard, J. Jernot, and M. Gomina, "Etude morphologique

d'un composite naturel. La fibre de lin," Revue des Composites et des Matériaux Avancés, vol. 16, p. 11, 2006

[28] C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas, and R. Santas, "Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production," Industrial crops and products, vol. 19, pp. 245-254, 2004

[29] M. Nardin, "Interfaces fibre-matrice dans les matériaux composites. Application aux fibres vegetales," *Revue des Composites et des Matériaux Avancés,* vol. 16, p. 49, 2006

[30] A. Mokhtari, "Modélisation du comportement et de la rupture des composites a matrices thermoplastiques," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzo, 2016

[31] http://www.jute.com/green-jute/agriculture-raw-jute. (08/03/2018)

[32] http://www.exportasia.in/jute-fibre.htm. (08/03/2018)

[33] https://www.forgottentribes.fr/blogs/lifestyle/le-chanvre-le-tissu-plus-ancien-au-monde et-Le plus écologique. (08/03/2018)

[34] http://kanirope.fr/index.php?cat=c3_Sisal--torsad--.html. (08/03/2018)

[35] http://www.thefruitforest.com/fruits-vegetables-and-herbs/ramie/. (08/03/2018)

[36] D. Hammiche, A. Boukerrou, H. Djidjelli, A. Kervoëlen, and Y. Grohens, "Étude des Propriétés physico-chimiques, thermiques et mécaniques des fibres d'alfa," *Revue des Composites et des Matériaux Avancés,* vol. 25, pp. 7-24, 2015

[37] D. Hammiche, A. Boukerrou, H. Djidjelli, A. Kervoëlen, and Y. Grohens, "Étude des propriétés physico-chimiques, thermiques et mécaniques des fibres d'alfa," Revue des Composites et des Matériaux Avancés, vol. 25, pp. 7-24, 2015

[38] https://sites.google.com/site/plantasensecunadria/actividades-con-floraautoctona/ esparto/l'alfa-spart ou sparte. (08/03/2018)

[39] http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/histoire-metiers/fibre-pate/page07.htm. (08/03/2018).

[40] M. Ragoubi, "Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne," Thèse de doctorat, Nancy 1, 2010.

[41] C. Álvarez, F. M. Reyes-Sosa, and B. Díez, "Enzymatic hydrolysis of biomass from wood," *Microbial biotechnology,* vol. 9, pp. 149-156, 2016

[42] J. Biagiotti, D. Puglia, and J. M. Kenny, "A review on natural fibre-based composites-part I: structure, processing and properties of vegetable fibres," *Journal of Natural Fibers,* vol. 1, pp. 37-68, 2004.

[43] H. Ville, "Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non," Thèse de doctorat, Ecole des Mines d'Alès, 2011

[44] D. Sedan, "Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment: influence sur les propriétés mécaniques du composite," Thèse de Doctorat, Limoges, 2007.

[45] E. AlarcónGutiérrez, "Influence de facteurs abiotiques sur la régulation des paramètres microbiens impliqués dans la dégradation de la matière organique d'une litière forestière Méditerranéenne," Thèse de doctorat, Aix Marseille 3, 2007

[46] R. Ntenga, "Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique defibres végétales pour le renforcement de matériaux composites," Thèse de doctorat,Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II; Université de Yaoundé, 2007

[47] L. Mohammed, M. N. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, "A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications," International Journal of Polymer Science, civil. 2015, 2015

[48] A. Gauvin., **"**Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment/Modification de l'hydratation du ciment par le bois" **.**Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure

des Mines de Saint Etienne, N°:331CD (2004).

[49] Broker et al [BRO74]

[50] R. D. TolêdoFilho, K. Scrivener, G.L. England, K. Ghavami "Durability of alkalisensitive sisal and coconut fibres' in cement mortar composites»**.** Cement and Concrete Composites, Volume 2 (2000) 127-143, cite par [MAG10]

[51] Ch. Baley, Y. Grohens, G. Levesque, F. Busnel, C. Pommel, O. Sire " influence des traitements chimiques sur les propriétés interfaciales et l'adhérence du système fibre de lin-résine polyester" **.**Matériaux, (2002).

[52] Claires. Partout, M. Le Troëdec, T. Chautard, J. Pierre Bonnet, A. Smith"Modification physico-chimiques des interactions entre les fibres de chanvre et la chaux : impacts sur les propriétés mécaniques des mortiers"**.**18éme congrès Français de Mécanique, 27-31 08 (2007)

[53] O. Bahloul, A. Bourzam, A. Bahloul, "Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment" **.**SBEIDCO, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

[54] M. Le Troëdec., "Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllo silicates, de chaux et de fibres cellulosiques». Thèse de doctorat, Université de Limoges**,** Faculté des Sciences et Techniques, N°65-2009

[55] M. Rokbi, H. Osmani**.,** "L'effet des traitements de surface des fibres sur les propriétés mécaniques de composites Polyester-fibres Alfa". 20ème Congrès Français de Mécanique, 29 Août au 02 Septembre 2011

[56] M. Merz oud. "Elaboration et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de disse dans la fabrication de la maçonnerie". Thèse de doctorat d'Etat, Université Badji Mokhtar, 2007, pp 123

[57] Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil, THESE, le 12 Décembre 2012]

[58] G.G.Giménez « Aportaciones a la química Del espartoespañol ». Anales de

l'Universidad de Murcia. Vol 13, Nº 1.Curso 1954-55

[59] USDA Plants Database, 1956

[60] M.Rhanem « L'alfa (Stipa tenacissima L.) Dans la plaine de Midelt (haut bassin versant de la Moulouya, Maroc) –Éléments de climatologie », Physio-Géo [En ligne], Vol 3 (janvier 2009)

[61] H.N.Le Houérou « Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique», Sécheresse, Vol 6, n° 2, pp. 167-182 (1995)

[62] L'alfa : Importance écologique et socio-économique », Portail de l'agriculture marocaine, Terre et Vie, N°61-62, (Novembre 2002)

[63] Houben H, Guillaud H. Earth construction–a comprehensive guide. London: Intermédiation Technologie; 1994

[64] Millogo Y, Morel J-C, Albert JE, Ghavami K. Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. Constr Build Mater; 52:71–78, 2014.

[65] Ramaswamy HS, Ahuja BM, Krishnamurthy S. Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres. Int J Cem Compos Lightweight Concr;5(1):3–13, 1983

[66] Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S. Performance of composite soil reinforced with barley straw. Cem Concr Compos, 27(5):617–21, 2005.

[67] O. Bahloul, A. Bourzam, A. Bahloul,''Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de ciment (Cas d'Alfa) '' SBEIDCO – 1st International Conference on SustainableBuiltEnvironment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algérie) - Octobre 12-14, 2009.

[68] . Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. Pertanika J SciTechnol;19(1):33–43, 2011

[69] Ravishankar U, Raghavan S. Coir stabilized lateritic soil for pavements. In: India ngeotechconf, Ahmedabad, India; 2004.

[70] mémoire de fin d'étude caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés -verre)

Références Bibliographiques

[71] la norme NFP 18-598 STANDARD Équivalent de sable, Paris, Association Française de Normalisation

[72] NFP 18-554

[73] EN 1097-6 : granulat Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 , indice de classement : P 18-650-6, 1998.

[74] la norme NF P 18-560 Norme française, « Analyse granulométrique par tamisage», NF P 18-560, Septembre 1990).

[75] norme NEF 15-301 La norme NF P 15-301 de 1994 donne la définition suivante : « Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus

[76] EN 196-3+A1 Janvier 2009 Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité

[77] NF EN 196-6 Avril 2012, Méthodes d'essai des ciments - détermination de la finesse

[78] norme NA 442- 2000 Norme Algérienne Ciment Composition, Spécifications Et Critères De Conformité Des Ciments Courants Algérie : IANOR

[79] la norme NF P94-050détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

[80] NF P94-053détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire-Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau

[81] NF P94-051 sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

[82] NF P94-056Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage

[83] NF P94-057Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation

[84] la norme (NFP 18-406) Essai de compression. DRUCKFESTIGKEITSPRUEFUNG.

[85] la norme NFP 18-407 Essai de traction par flexion.

[86] norme NF EN 196-1 Détermination des résistances

[87] ASTM D5930-97Méthode d'essai standard pour la conductivité thermique des plastiques au moyen d'une technique transitoire ligne-source